



UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA
Faculdade de Ciências e Tecnologia

Departamento de Engenharia Civil

Optimização das características de humedecimento e secagem de argamassas

Tiago André Reis Pereira

Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil – Reabilitação de Edifícios

Júri

Presidente: Doutor Válder da Guia Lúcio, Professor Associado da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Orientador: Doutor Fernando M. A. Henriques, Professor Catedrático da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Arguente: Doutora Paulina Faria Rodrigues, Professora Auxiliar da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Lisboa

2008

Agradecimentos

Gostaria de começar por agradecer ao Professor Doutor Fernando M. A. Henriques, pela disponibilidade para colaborar comigo, pela apresentação e sugestão do tema e pela concepção do desenvolvimento experimental.

Apesar de este ser um trabalho individual, existe um conjunto de pessoas, sem o qual seria extremamente difícil e ainda mais demorada a execução deste trabalho. O meu agradecimento:

Ao Professor Doutor Vasco M. Rato pelo acompanhamento regular do trabalho e pela enorme disponibilidade, quer para o esclarecimento das mais variadas dúvidas, como também para a resolução de vários problemas que surgiram ao longo do trabalho.

Aos colegas Daniel Rodrigues, Sandro Botas e Isabel Ferreira, pelo suporte constante durante a realização deste trabalho e também pela boa companhia durante todo o tempo, mas em especial durante o decorrer do desenvolvimento experimental.

À Engenheira Vânia Vilhena, por todas as razões, mas em especial pelo apoio incondicional, auxílio em algumas matérias e disponibilidade total para discutir, ouvir e sugerir. Tudo fica mais fácil quando se pode contar com um suporte tão importante e alguém com uma atitude tão positiva.

Por último, mas não menos importante, à minha família e amigos, que me acompanham ao longo da vida e tornam o meu dia a dia feliz e possível, do qual este trabalho fez parte. Vai para eles a maior fatia de agradecimentos.

Obrigado a todos.

Resumo

As argamassas constituem um dos tipos de produtos mais importantes e utilizados na construção. O seu uso vem desde os tempos mais antigos até aos dias de hoje, tendo sido utilizadas desde sempre como material de assentamento e também de revestimento.

As argamassas mais utilizadas na história da construção são as argamassas à base de cal e as argamassas à base de cimento. O desuso das argamassas de cal, com o aparecimento do cimento, originou uma perda relativa do seu conhecimento. O ressurgimento do uso da cal implica a necessidade de recuperar o conhecimento que se perdeu com o tempo, de maneira a ser possível fazer um uso adequado deste material. Este trabalho surge no âmbito da recuperação desse conhecimento. Para além da realização de uma pesquisa bibliográfica sobre os temas relevantes para este trabalho e a execução de um suporte teórico de apoio, realizou-se um desenvolvimento experimental com argamassas à base de cal com vários tipos de formulações, perfazendo um total de 24 argamassas diferentes. Realizaram-se ensaios de porosidade e massa volúmica, absorção de água por capilaridade, permeabilidade ao vapor de água, secagem, módulo de elasticidade dinâmico e resistências mecânicas para avaliar o comportamento relativamente a humedecimento e secagem.

Concluiu-se, entre outras coisas, que a dimensão do agregado, a quantidade de água utilizada e a porosidade, assumem um papel preponderante no desempenho das argamassas. Uma optimização das características de humedecimento e secagem passa pelo controle destes parâmetros. Concluiu-se também que a utilização de introdutores de ar constitui um factor importante para a optimização destas características.

Palavras-chave

Argamassa, cal, cimento, humedecimento, secagem, porosidade, introdutor de ar.

Abstract

Mortars are one of the most important and used materials in building construction. They have been used since the ancient times to nowadays, usually as jointing and re-pointing materials and as render materials.

The most used mortars in building construction are the lime based mortars and the cement mortars. The appearance of the cement material replaced the use of the lime, which had origin a loss in the knowledge of the lime material. The reuse of the lime requires recovering the lost knowledge, in order to use the lime products in the right way. This work appears as a part of that knowledge recovering. Besides the execution of a bibliographic research about the relevant subjects to this work and the execution of a theoretical support of the work, it has been done an experimental development with lime based mortars, with different combinations of material, resulting in a total of 24 different mortars. It has been done several tests like the porosity and the bulk density, capillary absorption, permeability to water vapour, drying tests, dynamic elasticity modulus and mechanical resistances, to evaluate the behaviour in relation to wetting and drying.

It has been concluded, among other things, that the dimensions of the aggregate, the quantity of water used and the porosity play an important role in the behaviour of the mortars. An improvement of the wetting and drying characteristics it is based in the control of these parameters. It has also been concluded that the use of an air-entraining agent constitutes an important factor to the improvement of these characteristics.

Keywords

Mortar, lime, cement, wetting, drying, porosity, air-entraining agent

Índice

Índice de quadros	XI
Índice de figuras	XI
1. Introdução	1
1.1. Contexto	1
1.2. Desenvolvimento da investigação	4
2. Estado actual de conhecimento	7
2.1. Argamassas	7
2.2. Caracterização de componentes	9
2.2.1. Ligantes	9
2.2.1.1. Ligantes aéreos	10
2.2.1.2. Ligantes hidráulicos.....	11
2.2.2. Agregados.....	13
2.2.3. Água	13
2.2.4. Adjuvantes.....	14
2.3. Influência do tipo de ligantes e traço das argamassas	15
2.3.1. Tipo de ligantes	15
2.3.2. Traço das argamassas	16
2.3.3. Considerações sobre humedecimento e secagem.....	17
2.4. Influência do agregado	19
2.4.1. Origem.....	19
2.4.2. Forma	20
2.4.3. Dimensão.....	20
2.4.4. Granulometria.....	21
2.5. Influência da água no comportamento das argamassas.....	22
2.6. Influência da utilização de um introdutor de ar	25

2.7. Influência da compactação das argamassas	27
2.8. Influência da cura	28
2.9. Porosidade das argamassas	29
2.9.1. Interligação dos poros	30
2.9.2. Forma da porosidade	30
2.9.3. Dimensões dos poros.....	31
2.9.4. Mecanismos de degradação relacionados com a porosidade	32
2.9.4.1. Degradação por ciclos de gelo/degelo	33
2.9.4.2. Degradação por ciclos de cristalização/dissolução.....	34
2.9.4.3. Degradação por ataque de sulfatos	34
2.10. Absorção de água por capilaridade.....	35
2.11. Difusão de vapor de água	37
3. Desenvolvimento experimental.....	41
3.1. Procedimentos experimentais de preparação de provetes	41
3.1.1. Análise de materiais	41
3.1.1.1. Areias.....	41
3.1.1.2. Ligantes	43
3.1.1.3. Água	43
3.1.1.4. Introdutor de ar	44
3.1.2. Definição de argamassas e identificação de provetes	44
3.1.2.1. Definição de argamassas	44
3.1.2.2. Sistema de identificação de provetes.....	47
3.1.3. Ensaio prévios e execução de argamassas	49
3.1.3.1. Determinação da baridade dos materiais	50
3.1.3.2. Execução de argamassas.....	52
3.1.3.3. Ensaio de consistência por espalhamento de argamassas.....	55
3.1.4. Cura	57

3.2. Procedimentos experimentais de ensaio a provetes	59
3.2.1. Considerações prévias sobre os ensaios	59
3.2.2. Ensaio de absorção de água por capilaridade.....	60
3.2.3. Ensaio de secagem	63
3.2.4. Ensaio de determinação do módulo de elasticidade dinâmico	65
3.2.5. Ensaio de resistência à flexão.....	67
3.2.6. Ensaio de resistência à compressão.....	68
3.2.7. Ensaio de determinação da porosidade aberta e determinação da massa volumica aparente	70
3.2.8. Ensaio de permeabilidade ao vapor de água	72
4. Apresentação e análise prévia de resultados.....	75
4.1. Baridade dos ligantes e agregados.....	75
4.2. Consistência das argamassas	76
4.3. Porosidade aberta e massa volumica	78
4.4. Módulo de elasticidade dinâmico	82
4.5. Resistências à flexão e compressão das argamassas	86
4.6. Absorção de água por capilaridade.....	91
4.7. Permeabilidade ao vapor de água	95
4.8. Secagem das argamassas	99
5. Análise relacional.....	105
5.1. Porosidade e quantidade de água das argamassas	105
5.2. Porosidade e resistências mecânicas das argamassas	107
5.3. Porosidade e absorção de água por capilaridade das argamassas	110
5.4. Porosidade e permeabilidade ao vapor de água das argamassas	114
5.5. Porosidade e secagem das argamassas.....	117
5.6. Permeabilidade e secagem das argamassas	120
6. Conclusões	123

7. Sugestão de trabalhos adicionais/futuros	127
8. Referências bibliográficas	129
9. Anexos.....	133
9.1. Anexo 1.....	133
9.2. Anexo 2.....	136

Índice de quadros

Quadro 3.1. – Quadro de constituição de argamassas	46
Quadro 3.2. – Quadro de correspondência de identificação ligante → numeração ...	48
Quadro 3.3. – Quadro de correspondência de identificação areia → designação	48
Quadro 3.4. – Quadro de síntese de identificação de provetes	49
Quadro 3.5. – Quadro de volumes dos recipientes utilizados nos ensaios de determinação de baridades	51
Quadro 3.6. – Quadro de períodos de cura das diferentes argamassas	58
Quadro 4.1. – Quadro de baridades de ligantes e agregados	75
Quadro 4.2. – Quantidades de água e valores de espalhamento das argamassas	77
Quadro 4.3. – Porosidades e massas volúmicas aparentes das argamassas	79
Quadro 4.4. – Valores dos módulos de elasticidade dinâmicos das argamassas	83
Quadro 4.5. – Valores de resistência à flexão e compressão das argamassas	86
Quadro 4.6. – Coeficientes de absorção de água por capilaridade e valores assintóticos de absorção das argamassas	92
Quadro 4.7. – Coeficientes de difusão de vapor de água das argamassas	96
Quadro 4.8. – Índices de secagem das argamassas	101

Índice de figuras

Figura 2.1. - Esquema de arranjo de partículas sólidas de uma argamassa e respectiva porosidade	24
Figura 2.2. - Imagens microscópicas das estruturas de argamassas à base de cal aérea: a) Sem introdutor de ar; b) Com introdutor	26
Figura 2.3. - Gráfico de absorção de água por capilaridade em pastas de cal aérea com diferentes índices água/ligante	37
Figura 3.1. – Areias utilizadas na execução das argamassas	42
Figura 3.2. – Introdutor de ar	44
Figura 3.3. – Provete prismático e provete circular	47
Figura 3.4. – Recipientes para determinação de baridades	50
Figura 3.5. – Sistemas de ensaio de baridade de areias e ligantes	52
Figura 3.6. – Argamassa fresca em molde prismático	55
Figura 3.7. – a) Mesa de ensaio de espalhamento, molde tronco-cônico e varão metálico; b) Craveira e régua para medição de espalhamentos	56

Figura 3.8. – Provetes acondicionados em cura	58
Figura 3.9. – a) Ensaio de absorção de água por capilaridade; b) Esquema de disposição dos equipamentos e materiais do ensaio de absorção de água por capilaridade	62
Figura 3.10. – Ensaio de secagem. Sistema de ensaio no interior da protecção de cartão	64
Figura 3.11. – a) Equipamento de medição; b) Medição do módulo de elasticidade	66
Figura 3.12. – Esquema de posições adoptadas para as medições do módulo de elasticidade dinâmico	66
Figura 3.13. – Peças metálicas específicas de ensaio à tracção	67
Figura 3.14. – a) Ensaio de resistência à flexão; b) Partes resultantes dos provetes ensaiados à flexão	68
Figura 3.15. – a) Cápsula de ensaio de compressão; b) Peças metálicas de suporte de cápsula e de carregamento	69
Figura 3.16. – Ensaio de resistência à compressão	69
Figura 3.17. – Pedacos resultantes de ensaios de compressão para utilização na determinação de porosidade e massa volúmica aparente	70
Figura 3.18. – Ensaio de determinação da porosidade e massa volúmica aparente ...	71
Figura 3.19. – a) Provete cilíndricos preparados em cápsulas para ensaio de permeabilidade; b) Câmara climática de ensaio de permeabilidade	73
Figura 4.1. – Comparação de resultados de ensaio de espalhamento de argamassas com e sem introdutor de ar	77
Figura 4.2. – Porosidades das argamassas com diferentes quantidades de água	80
Figura 4.3. – Comparação de valores de porosidade de argamassas com e sem introdutor de ar	82
Figura 4.4. – Módulos de elasticidade dinâmicos das argamassas	84
Figura 4.5. – Comparação de valores de módulo de elasticidade dinâmico de argamassas com e sem utilização de introdutor de ar	85
Figura 4.6. – Resistências à flexão das argamassas	87
Figura 4.7. – Resistências à compressão das argamassas	88
Figura 4.8. – Resistências mecânicas de argamassas com e sem utilização de introdutor de ar	90

Figura 4.9. – Gráficos de evolução da absorção de água por capilaridade das argamassas, em função do tempo	93
Figura 4.10. – Anomalias em provetes, derivadas do comportamento do silicone ...	96
Figura 4.11. – Valores de coeficiente de difusão de vapor de água das argamassas .	97
Figura 4.12. – Valores de coeficientes de difusão de vapor de água de argamassas com e sem utilização de introdutor de ar	98
Figura 4.13. – Índices de secagem das argamassas	101
Figura 4.14. – Curvas de secagem das argamassas, em função do tempo	102
Figura 4.15. – Comparação de índices de secagem de argamassas com e sem utilização de introdutor de ar	103
Figura 5.1. – Relação entre os valores de quantidade de água e porosidade das argamassas	106
Figura 5.2. – Relação entre a porosidade e a resistência à flexão das argamassas ...	107
Figura 5.3. – Relação entre a porosidade e a resistência à compressão das argamassas	108
Figura 5.4. – Relação entre a porosidade e as resistências mecânicas de argamassas com e sem a utilização de introdutor de ar	109
Figura 5.5. – Relação entre a porosidade e o coeficiente de absorção de água por capilaridade das argamassas	111
Figura 5.6. – Relação entre a porosidade e o valor assintótico de absorção de água por capilaridade	112
Figura 5.7. – Relação entre a porosidade e características de absorção de água por capilaridade em argamassas com e sem utilização de introdutor de ar	113
Figura 5.8. – Relação entre a porosidade e a permeabilidade ao vapor de água das argamassas	115
Figura 5.9. – Relação entre a porosidade e a permeabilidade ao vapor de água em argamassas com e sem a utilização de introdutor de ar	116
Figura 5.10. – Relação entre a porosidade e o índice de secagem das argamassas ...	118
Figura 5.11. – Relação entre a porosidade e o índice de secagem, em argamassas com e sem utilização de introdutor de ar	119
Figura 5.12. – Relação entre a permeabilidade ao vapor de água e o índice de secagem das argamassas	120

Figura 5.13. – Relação entre a permeabilidade e o índice de secagem em argamassas com e sem utilização de introdutor de ar	122
Figura 9.1. – Coeficientes de absorção de água por capilaridade das argamassas	136
Figura 9.2. – Valores assintóticos de absorção de água por capilaridade	137
Figura 9.3. – Comparação de argamassas com e sem utilização de introdutor de ar. a) Coeficiente de absorção de água por capilaridade; b) Valor assintótico de absorção de água por capilaridade	137

1. Introdução

1.1. Contexto

O presente trabalho destina-se a aprofundar o conhecimento sobre as características, propriedades e desempenho de argamassas. Mais especificamente, procura otimizar as características de humedecimento e secagem de argamassas. Para se compreender melhor o objectivo da realização de um trabalho deste tipo, importa conhecer a evolução do uso das argamassas ao longo do tempo e a orientação levada nos dias de hoje.

As argamassas são um tipo de material utilizado na construção de edifícios desde há muitos séculos, aparecendo inicialmente associadas a construção com pedra, como é possível observar no património edificado que chegou até aos dias de hoje [50]. O uso de argamassas na construção é essencialmente como material de assentamento e revestimento, uso este que se mantém desde as suas aplicações mais antigas até às aplicações nos dias de hoje. Em função do tipo de aplicação das argamassas, as suas formulações vão variar para a obtenção de um desempenho adequado. Estas formulações podem ser diversas e foram conhecendo evoluções ao longo do tempo, quer pela experiência e conhecimento obtido ao longo de muitos anos de aplicação, quer também pelo aparecimento de novos materiais ou componentes que passaram a ser usados.

As argamassas à base de cal foram as mais utilizadas ao longo dos séculos, facto que é conhecido através de registos históricos e, mais importante ainda, através da análise do património edificado que chegou até aos nossos dias como já referido, sendo que muito deste património exhibe um estado de conservação destes materiais que é assinalável, tendo em conta a idade apresentada [48]. Estes factos provam de forma inequívoca a qualidade deste material para uso na construção, principalmente em termos de durabilidade.

O surgimento do cimento e consequentemente de argamassas de cimento, veio alterar de forma muito acentuada o uso das argamassas de cal. Rapidamente se percebeu que o

cimento colmatava alguns dos inconvenientes apresentados pelas argamassas de cal. As argamassas de cimento exibem valores de resistências mecânicas bastante superiores àqueles evidenciados pelas argamassas anteriormente utilizadas e, para além disso, as resistências mecânicas são obtidas num intervalo de tempo mais curto, ou seja, a cura deste tipo de argamassas é bastante mais rápida, facto que vinha facilitar e acelerar certos tipos de trabalho, como trabalhos de conservação [3]. Por estas razões, o seu uso começou a ser progressivamente maior, substituindo quase na totalidade as argamassas de cal, aplicando as argamassas de cimento a todo o tipo de trabalhos e intervenções de forma quase indiscriminada, prática que veio mais tarde a revelar-se errada e bastante destrutiva.

A grande utilização de argamassas de cimento e do cimento em geral, que se estende até aos nossos dias, originou que o conhecimento sobre este material fosse crescendo, quer através do grande desenvolvimento da indústria destes materiais e da experiência obtida, quer por investigação, sendo hoje bastante sólido e o seu uso bastante padronizado.

Através da experiência e do estudo desenvolvido chegou-se à conclusão que a utilização de argamassas de cimento é desaconselhada e, por vezes, mesmo inapropriada para certo tipo de trabalhos ou intervenções, especialmente intervenções de conservação e reabilitação. Estas situações prendem-se sobretudo com questões relativas a incompatibilidades com outros materiais, nomeadamente incompatibilidades físicas, elevado teor de sais e também reduzida vida útil comparativamente às argamassas de cal [3, 48].

Com o reconhecimento destes inconvenientes relativos às argamassas de cimento surgiu a necessidade de recorrer a outro tipo de argamassas, nomeadamente regressar à utilização de argamassas à base de cal, que tinham já provas dadas ao longo do tempo. Com esta necessidade levantou-se o problema de, devido ao facto da utilização de argamassas de cal ter sido praticamente abandonada com o surgimento das argamassas de cimento, ter-se perdido também uma grande parte do seu conhecimento relativamente a características, formulações e desempenho.

Numa tentativa de recuperar esse conhecimento, e reabilitar o uso de argamassas à base de cal, foram e são feitos ainda hoje inúmeros trabalhos de investigação com o intuito

de aprofundar o conhecimento sobre este tipo de argamassas. Esta prática é relativa não só ao estudo de argamassas de cal, mas um pouco em relação a todo o tipo de materiais usados na construção, fruto da necessidade que se verifica hoje de responder às mais variadas exigências, como sendo de conhecimento, funcionamento, desempenho e segurança, para referir algumas. Existem inúmeros trabalhos de investigação, muitos deles referidos na bibliografia deste trabalho, que visam aprofundar o conhecimento sobre caracterização de argamassas, suas formulações, desempenho, entre outros temas.

É neste âmbito que este trabalho de investigação se desenvolve, ou seja, na tentativa de acrescentar algo mais ao conhecimento que se possui actualmente sobre o funcionamento de argamassas, neste caso relativo à optimização das características de humedecimento e secagem de argamassas. Pretende-se com esta investigação consolidar conhecimentos já adquiridos em outros trabalhos e, se possível, acrescentar e evidenciar novos factos que permitam um avanço no conhecimento destas matérias, contribuindo assim para uma melhor compreensão e uso das argamassas.

Desde a reutilização gradual da cal, o avanço relativo ao seu conhecimento tem sido grande. No que diz respeito às resistências mecânicas e estrutura das argamassas o conhecimento está bastante desenvolvido; no entanto, relativamente a características de humedecimento e secagem, entre outras, a incidência de estudo é algo limitada. Ainda assim é possível tecer algumas considerações acerca deste tema, como se fará de seguida.

Facilmente se percebe que o parâmetro que influencia de forma mais significativa o comportamento de humedecimento e secagem é a porosidade, pois é através dos poros que se processa a circulação de água e vapor no interior das argamassas. É unanimemente aceite que um aumento de porosidade afecta de forma significativa as resistências mecânicas das argamassas, levando a um abaixamento desses valores. No entanto, do ponto de vista da optimização das características de humedecimento e secagem este aumento parece ser importante e até essencial. Assim, em função do tipo de comportamento que se considere mais importante para o desempenho e durabilidade das argamassas que se pretende aplicar, é necessário estabelecer um equilíbrio entre as suas diferentes características.

Relativamente às características de humedecimento e secagem, é importante referir que um aumento de porosidade benéfico para a sua optimização deve assumir características específicas. Tanto o humedecimento como a secagem estão directamente relacionados com a porosidade aberta uma vez que é através deste tipo de poros que o transporte se efectua, bem como a ligação com o exterior. Então, para além de passar pela análise deste tipo de porosidade, a optimização deve ter também em conta a dimensão e conexão dos poros.

Pensa-se que quanto maior for a porosidade e as suas dimensões, maior será a quantidade de água absorvida por capilaridade pelas argamassas. Relativamente à secagem, pensa-se que maiores valores de porosidade originam processos de secagem mais rápidos, uma vez que a ligação entre o interior das argamassas e o exterior é melhorada e as argamassas tornam-se mais permeáveis.

1.2. Desenvolvimento da investigação

O desenvolvimento de trabalhos de investigação com componente experimental segue normalmente uma metodologia bem definida e padronizada. O presente trabalho não é excepção, seguindo essa mesma linha de desenvolvimento, que se passa de seguida a expor:

Numa primeira fase é abordado e reunido conhecimento já obtido relativamente às argamassas, mais especificamente, em relação aos parâmetros e características relevantes para o trabalho que se pretende desenvolver. Esta tarefa tem uma importância muito significativa, permitindo a obtenção e actualização do conhecimento relativamente aos vários temas e estabelecendo o nível de conhecimento com que se desenvolve toda a investigação. Este contacto com o conhecimento já reunido permite desde logo refinar a abordagem ao trabalho de investigação e estabelecer estratégias de desenvolvimento do trabalho, bem como torná-lo mais objectivo.

Numa segunda fase é abordada a parte experimental da investigação, que consiste na execução de um conjunto de argamassas com diferentes formulações, que dão origem

aos provetes experimentais com que se realizam os diferentes ensaios. Posteriormente realizam-se os diversos ensaios previamente estabelecidos, que se julgam adequados para a observação de factos úteis e relevantes, para se poder tirar conclusões relativas ao tema que se pretende estudar.

Na terceira fase do trabalho os dados relativos aos ensaios são tratados e alvo de uma análise preliminar onde são estabelecidas algumas primeiras tendências e evidenciados alguns resultados. Posteriormente é efectuada uma análise mais aprofundada, correlacionando os dados de vários ensaios conjuntamente com as características das várias argamassas, efectuando análises comparativas entre diversos parâmetros, tentando encontrar tendências e relações mais amplas e não imediatas.

Por último, com base na investigação desenvolvida e nos resultados obtidos, retiram-se conclusões em relação ao comportamento exibido pelas argamassas e é efectuada uma confrontação com os estudos levados a cabo anteriormente. Finalmente são propostos temas de investigação futuros, para aprofundamento dos dados obtidos.

2. Estado actual de conhecimento

O presente capítulo tem por objectivo fazer uma síntese do conhecimento científico actual, útil à execução e compreensão do presente trabalho. Este conhecimento surge da execução de trabalhos e investigações realizadas anteriormente por diversos autores, que se interligam e dão continuidade ao desenvolvimento do conhecimento, contribuindo assim para a sua evolução. Procurou-se recorrer a vários documentos relativamente a cada aspecto abordado no capítulo, numa tentativa de obter um suporte sólido de informação, utilizando sempre que possível os documentos mais recentes, procurando uma base actualizada de informação. A informação reunida neste capítulo serve de suporte à interpretação dos resultados obtidos no desenvolvimento experimental do trabalho e para a sua confrontação com o conhecimento obtido anteriormente, constituindo desta forma um auxílio para a obtenção de conclusões.

2.1. Argamassas

De uma forma bastante simples e em jeito de definição, as argamassas são produtos obtidos pela mistura de um ou mais ligantes, agregados, água e eventuais aditivos. A formulação de argamassas é bastante diversa e varia sobretudo em função do tipo de aplicação previsto [23]. Em função do tipo de aplicação, procura-se uma concepção que dote a argamassa de características adequadas ao fim a que se destina, podendo cada um dos seus constituintes sofrer alterações, quer em termos qualitativos, como em termos quantitativos

Os vários tipos de argamassas têm diferentes designações, atribuídas geralmente em função do tipo e número de ligantes utilizados, pois são estes que vão influenciar em maior escala as características e comportamento das argamassas. Em geral podem dividir-se as argamassas em 3 grandes grupos:

- Argamassas à base de cal
- Argamassas à base de cimento
- Argamassas bastardas

As argamassas à base de cal são argamassas cujo ligante utilizado é a cal. Existem dois tipos de cal: cal aérea e cal hidráulica. Estes dois tipos diferem sobretudo na forma como se processam as reacções que levam ao endurecimento e desenvolvimento de resistências mecânicas das argamassas que integram. Estas diferenças de reacção explicam-se pelas diferenças químicas que existem entre componentes dos dois tipos de cal.

Às argamassas à base de cal, em especial aquelas à base de cal aérea, são reconhecidas as seguintes características e propriedades: baixas resistências mecânicas e obtenção lenta das mesmas, boa deformabilidade, elevada absorção capilar, elevada permeabilidade ao vapor de água, reduzida resistência à acção mecânica de sais solúveis e dificuldade em fazer presa em ambientes muito húmidos ou com fraca presença de CO_2 [39, 41, 46].

As argamassas à base de cimento são argamassas cujo ligante utilizado é o cimento. O cimento é um tipo de ligante cujo processo de presa nas argamassas se desencadeia de forma semelhante ao que acontece nas argamassas de cal hidráulica, através das reacções de hidratação dos silicatos e aluminatos.

Às argamassas à base de cimento são reconhecidas as seguintes características e propriedades: elevadas resistências mecânicas, baixa deformabilidade, susceptibilidade de ataque por sulfatos, baixa absorção capilar, baixa permeabilidade ao vapor de água, realização de presa em ambientes muito húmidos e fraca presença em CO_2 , pois esta é feita por hidratação [46].

As argamassas bastardas são argamassas cujo ligante resulta da mistura de dois tipos de ligante diferentes, um aéreo e um hidráulico. Esta opção é normalmente utilizada quando a utilização de somente um ligante apresenta inconvenientes, ou se revela insuficiente para a aplicação que se pretende, optando assim pela utilização de dois ligantes distintos em simultâneo, e dotando a argamassa de características associadas a cada um dos ligantes, originando desta forma um produto diferente e com características melhoradas. As argamassas de cal aérea e cimento apresentam características e desempenhos entre as argamassas à base de cal e as argamassas à base de cimento.

2.2. Caracterização de componentes

2.2.1. Ligantes

Os ligantes são os componentes das argamassas que garantem coesão à mistura, e podem ser assumidos como o seu elemento mais influente, garantindo a união entre todos os componentes e dotando, desta forma, as argamassas de resistências mecânicas.

Para além de promoverem a coesão da mistura, os ligantes vão influenciar as restantes características, propriedades e desempenho das argamassas, como se verá mais à frente.

No âmbito deste trabalho importa abordar os ligantes minerais, uma vez que é este tipo de ligantes que vai ser utilizado. Assim, os ligantes minerais podem dividir-se em dois grandes grupos:

- Aéreos
- Hidráulicos

Os ligantes minerais têm como compostos comuns o calcário e a argila. Alguns destes ligantes podem ser obtidos de forma natural ou de forma artificial. Os ligantes classificam-se de naturais quando a sua obtenção provém de pedras calcárias com determinado teor em argila, não sendo necessário adicionar mais nenhum tipo de produto ou material para se obter o produto final ligante. A obtenção do produto final ligante passa por um processo de cozedura das pedras. Os ligantes artificiais resultam da mistura de vários materiais, sendo que neste caso, o calcário e a argila, entre outros, têm origem distinta.

A distinção entre os vários tipos de ligantes naturais assenta sobretudo no teor de argila associado à pedra. Assim para a obtenção de cal aérea recorre-se a pedras calcárias com um teor em argila bastante baixo ($\leq 5\%$), formando praticamente calcário puro. Para a obtenção de cal hidráulica recorre-se a calcários margosos, ou seja com uma quantidade

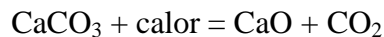
de argila significativa ($>5\%$ e $\leq 20\%$). Finalmente, para obtenção de cimentos naturais recorre-se a margas calcárias, ou seja, rochas em que a quantidade de argila é bastante elevada ($>20\%$ e $\leq 40\%$) [8].

Entre os ligantes artificiais o mais importante é sem dúvida o cimento Portland, que resultou da descoberta de que era possível obter um produto ligante através da mistura de vários componentes, não necessitando estes de ocorrer conjuntamente na natureza. O calcário e a argila são então misturados sob a forma de pó e depois submetidos à acção de temperaturas da ordem de 1450°C , que dão origem à obtenção do clínquer, o principal composto do cimento [8]. Para além do cimento Portland, existem também cais hidráulicas artificiais.

2.2.1.1. Ligantes aéreos

Os ligantes aéreos, mais precisamente as cais aéreas, resultam de calcários que são sujeitos a várias etapas de transformação, até se obter o produto final para aplicar em argamassas. Este produto final, que constitui o ligante, é o hidróxido de cálcio e pode ser utilizado sob a forma de pó ou pasta. Os ligantes aéreos têm a característica distintiva de o seu endurecimento se dar por carbonatação do hidróxido de cálcio. A carbonatação consiste na reacção que se desenvolve com o hidróxido de cálcio e o dióxido de carbono presente na atmosfera, originando assim o carbonato de cálcio (produto endurecido), responsável pela obtenção de resistências mecânicas nas argamassas de cal aérea. As várias etapas da cal aérea podem ser expressas pelas seguintes equações químicas [8, 46]:

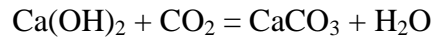
- Cozedura do calcário para obtenção de cal viva:



- Extinção da cal viva para obtenção do hidróxido de cálcio:



- Endurecimento da cal em argamassa (carbonatação):



A taxa de carbonatação é influenciada pelas condições ambientes, como a concentração de dióxido de carbono na atmosfera, a humidade relativa e a temperatura. O processo de carbonatação é um processo lento e pode demorar anos até estar completo, podendo até nunca ficar concluído [23, 37]. À medida que o processo de carbonatação das argamassas avança torna-se mais difícil a difusão do dióxido de carbono pela argamassa, uma vez que a carbonatação se desenvolve do exterior para o interior sendo esta última parte mais difícil de atingir por parte do dióxido de carbono, principalmente pela formação progressiva de cristais de carbonato de cálcio, que ao se formarem ocupam o espaço dos poros, obstruindo-os e por essa razão o processo de carbonatação evolui lentamente, não atingindo normalmente a completa carbonatação [23, 40].

Um aspecto muito importante relativo aos ligantes aéreos é que neste tipo de ligante a água que se utiliza na amassadura não tem qualquer papel no seu processo de endurecimento. Estes ligantes não têm qualquer tipo de reacção com a água, contribuindo esta sim, para o processo de amassadura dos vários componentes das argamassas, promovendo a adesão do ligante ao agregado e conferindo trabalhabilidade às argamassas, para que estas sejam possíveis de aplicar [43].

2.2.1.2. Ligantes hidráulicos

Existem variados tipos de ligantes hidráulicos. A designação de ligante hidráulico surge quando existem elementos nos ligantes que necessitam de água para desenvolverem reacções e assim originarem o endurecimento do material. A grande vantagem deste tipo de material relativamente aos ligantes aéreos é que, no caso dos ligantes hidráulicos, o endurecimento é possível mesmo debaixo de água. Relativamente aos tipos de ligantes hidráulicos, porventura os mais importantes e de relevância para o presente trabalho, são as cals hidráulicas e o cimento.

As cals hidráulicas podem ser naturais ou artificiais, sendo que as naturais resultam da transformação de calcários margosos, como se viu atrás, e as artificiais da adição de fileres inertes ao clínquer do cimento [46]. A presença de maiores percentagens de

argilas nos calcários que dão origem à cal hidráulica origina que aquando da cozedura, e ao contrário do que acontece para as cais aéreas, se formem silicatos e aluminatos, que são compostos que endurecem quando hidratados, tanto ao ar como em água. Os principais constituintes das cais hidráulicas naturais são o silicato de cálcio, os aluminatos de cálcio e o hidróxido de cálcio [39]. Uma parte da cal está livre e portanto endurece por carbonatação, tal como acontece no caso das cais aéreas; outra parte está associada aos silicatos e aluminatos e portanto endurece através de hidratação. Diversos trabalhos afirmam que as cais hidráulicas obtêm resistências mecânicas mais elevadas do que as cais aéreas, devido à parte dos seus componentes que endurece por hidratação, revelando desta forma maior durabilidade. No entanto, S. Pavia e E. Tracy [41], obtiveram no seu estudo referente a cais aéreas e ligeiramente hidráulicas conclusões contrárias à opinião geral, quer em relação a resistências mecânicas, como também relativamente a outras características. Este facto sugere que a opinião geral de que as cais hidráulicas são mais resistentes e têm maior durabilidade que as cais aéreas, se confirma a partir de uma certa proporção de componentes hidráulicos nas cais hidráulicas.

Os cimentos podem ser de origem natural ou artificial, sendo que os naturais resultam da transformação de margas calcárias. A obtenção do cimento natural é semelhante à das cais hidráulicas. A diferença no teor de argilas nos cimentos naturais vai ser responsável pela rapidez da presa destes materiais. Em relação ao cimento Portland, depois da obtenção do clínquer composto de silicato tricálcico, silicato bicálcico, aluminato tricálcico e aluminoferrato tetracálcico e depois da adição de alguns adjuvantes e gesso, entre outros produtos, procede-se à moagem e finalmente obtém-se o cimento [8].

Uma vez que a presa dos ligantes hidráulicos não é feita unicamente através de carbonatação (mas sim maioritariamente por hidratação de componentes), o seu endurecimento é mais rápido que no caso dos ligantes aéreos, sendo que esta é uma das principais vantagens reconhecidas ao cimento relativamente à cal aérea.

Como já referido anteriormente, a água presente na amassadura dos ligantes hidráulicos, para além de assumir as funções já descritas para o caso dos ligantes aéreos, tem

também a função de desenvolver reacções com alguns elementos que compõem estes produtos e que dão origem ao seu endurecimento [43].

2.2.2. Agregados

Os agregados constituem, geralmente, a maior porção de material constituinte das argamassas. Tratando-se de argamassas, os agregados que integram a mistura são areias. Este componente pode apresentar algumas variações, nomeadamente em relação à sua origem e granulometria. A presença dos agregados confere às argamassas algumas vantagens, contribuindo para a estabilidade dimensional ao limitar a sua contracção durante a secagem, durabilidade e para a sua resistência mecânica [50]. Os agregados, nomeadamente aqueles de origem mineral, apresentam diferentes composições químicas em função da sua origem rochosa e este facto vai conferir aos agregados diferentes características e comportamentos, que consequentemente vão afectar as características e comportamento das argamassas. Para além da sua origem e granulometria, também a sua forma vai ter influência significativa na argamassa, conforme se tratem de agregados de forma arredondada ou angular [32].

2.2.3. Água

A água, a par dos ligantes e dos agregados, é também um dos elementos fundamentais para se produzir argamassas. Como referido atrás, esta pode assumir mais do que uma função, conforme o tipo de ligante que se esteja a utilizar. Assim, caso se trate de um ligante aéreo, a sua função é somente de promoção do envolvimento dos componentes da argamassa a fim de se obter uma mistura homogénea e coesa aquando do seu endurecimento. Caso se trate de um ligante hidráulico, a sua função, para além do referido acima, vai ser também a de agente de reacção com o ligante de modo a desenvolver o endurecimento da argamassa.

Existem, no entanto, outras considerações importantes em relação à água utilizada na execução de argamassas. A quantidade de água utilizada na execução das argamassas é normalmente superior àquela que seria necessária para a sua obtenção; tal facto deve-se

à necessidade de se ter uma determinada trabalhabilidade para se conseguir aplicar a argamassa. A quantidade de água é muito importante na definição de algumas características, como a porosidade da argamassa e consequentemente influencia o seu comportamento, sendo um dos principais parâmetros a controlar durante a sua execução [2].

2.2.4. Adjuvantes

Adjuvantes são produtos que são adicionados às argamassas, normalmente em quantidades muito pequenas, em porções inferiores a 5% da massa de ligante [8]. Estes produtos não são fundamentais para a execução de uma argamassa, no entanto, por vezes são necessários para uma adequada utilização.

Os adjuvantes não devem ser confundidos com aditivos, que são substâncias adicionadas a argamassas ou betões, em geral em quantidades superiores a 5% para actuarem nas suas propriedades. Esta definição engloba também os produtos adicionados em quantidades inferiores a 5%, mas que não tenham qualquer acção quer no estado fluído, sólido, ou ainda na passagem do estado líquido ao estado sólido [8].

O conhecimento do comportamento deste tipo de produtos em argamassas à base de cimento está bem desenvolvido, uma vez que a maioria destes produtos foi concebido para ser utilizado em misturas com este tipo de ligante. Relativamente às argamassas à base de cal o conhecimento não é tão profundo, visto que a comercialização de adjuvantes se iniciou na época de expansão do cimento Portland e o estudo foi direccionado para esse ligante. No auge da utilização das cals não era comum o uso deste tipo de produtos, a não ser sob a forma de produtos naturais e correntes, pensa-se que fundamentalmente para melhorar a trabalhabilidade das misturas. Somente desde há alguns anos é que o uso da cal tem vindo a ser reintroduzido, daí que o conhecimento da actuação relativamente a este tipo de ligantes seja escasso.

A utilização de adjuvantes pode ter em vista a actuação em diferentes etapas da produção de argamassas. Assim, podem ser utilizados com o objectivo de actuar nas seguintes fases:

- Execução
- Aplicação
- Período de serviço

A razão de utilização de adjuvantes é a de alterar, ou melhorar, as características e/ou o desempenho das argamassas, que de outra forma não seria possível. Os adjuvantes usados com maior frequência são: plastificantes, introdutores de ar e retentores de água [39, 47, 48].

2.3. Influência do tipo de ligantes e traço das argamassas

2.3.1. Tipo de ligantes

O tipo de ligante utilizado numa argamassa é um factor muito importante, e talvez o mais decisivo, nas suas características e comportamento. As diferenças nas características e comportamento das argamassas devem-se sobretudo às composições bastante distintas dos vários tipos de ligantes que se podem utilizar na execução das argamassas, como foi já referido.

As várias composições dos ligantes dão origem a diferentes processos de endurecimento das argamassas, ligações entre as várias partículas de ligante e destas com os agregados e sobretudo e mais importante, a diferentes resistências mecânicas e porosidades.

De um modo geral, as várias investigações efectuadas até hoje evidenciam que a utilização de ligantes com componentes que endurecem através de hidratação, ou que contenham adições que funcionem do mesmo modo, revelam resistências mecânicas superiores àqueles que endurecem através de carbonatação. Este facto está relacionado com os cristais que se formam nos diferentes casos e a ligação que existe entre estes cristais e também com os cristais e o agregado, que indica que é mais forte no caso de ligantes hidráulicos [29, 39]. Assim, com base nestas afirmações e como é possível observar através de vários trabalhos, os ligantes que permitem obter argamassas com

maiores resistências mecânicas são em geral os cimentos, seguidos das cals hidráulicas e finalmente as cals aéreas. Os ligantes bastardos (mistura de um ligante hidráulico e um aéreo, em geral cimento com cal aérea), permitem obter resistências entre os limites do cimento e a cal aérea, dependendo da dosagem de cada um dos tipos de ligante. Esta observação é válida não só para resistências mecânicas, como também para as restantes características, propriedades e desempenho.

Os vários tipos de ligante originam argamassas com diferentes porosidades, sendo que a cal aérea é o ligante que origina maior porosidade, seguida da cal hidráulica e finalmente do cimento. Estas diferentes porosidades fazem com que as permeabilidades originadas por estes ligantes sejam também diferentes, relacionando-se de forma directa [37, 39]. Para além da porosidade assumir valores mais elevados nas argamassas de cal aérea, também as dimensões dos poros destas argamassas possuem maiores dimensões, que decrescem nas argamassas de cal hidráulica e também nas de cimento [39].

Relativamente às dimensões dos poros exibidos pelas argamassas com diferentes tipos de ligantes há a acrescentar que nem todos os ligantes apresentam distribuições de dimensões iguais. Assim, as argamassas de cal aérea tendem a apresentar uma distribuição bimodal de dimensões de poros, isto é, existem dois intervalos de dimensões de poros predominantes nas argamassas, com dimensões diferentes. As argamassas de cal hidráulica e as argamassas de cimento apresentam em geral distribuições de dimensões simples, ou seja, com predominância de um pequeno intervalo de valores [37]. As argamassas bastardas com maior quantidade de cal aérea tendem a ter uma distribuição de dimensões bimodal, que tende a desaparecer quando a quantidade de cimento aumenta, sendo que argamassas com iguais quantidades dos dois ligantes tendem a não apresentar este tipo de distribuição.

2.3.2. Traço das argamassas

O traço de uma argamassa é definido como a relação entre as quantidades de ligante e agregado (geralmente a quantidade de ligante sobre a quantidade de agregado) e pode ser expresso em relação à massa, ou volume, de ambos. Em geral, a quantidade de ligante não ultrapassa a quantidade de agregado, logo os valores do traço de argamassas

vão variar entre os limites de 0 e 1, sendo que os traços mais comuns em argamassas são o 1:2 e 1:3.

O traço é um dos factores mais influentes para as características e desempenho das argamassas. A influência do traço de uma argamassa faz-se sentir, principalmente, em dois parâmetros: a resistência mecânica e a porosidade.

Dependendo do tipo de ligante usado, estes parâmetros podem ser influenciados de formas diferentes. Assim, relativamente às resistências mecânicas, é unanimemente aceite que, quanto maior for o traço, maiores são as resistências mecânicas desenvolvidas pela argamassa, independentemente do tipo de ligante que se utilize [3, 50]. Em relação ao seu efeito na porosidade da argamassa as conclusões não são tão lineares. Estudos efectuados indicam que no caso de argamassas de cimento, quanto maior for o traço, ou seja, quanto maior for a quantidade de ligante, menor será o valor da porosidade. No caso de utilização de um ligante à base de cal obtém-se uma relação diferente, ou seja, quanto maior a quantidade de ligante, maior será também a porosidade da argamassa [3, 32, 34].

2.3.3. Considerações sobre humedecimento e secagem

Relativamente ao tema específico em análise neste trabalho, é esperado que as argamassas de cal aérea apresentem os menores valores assintóticos de absorção de água, em virtude das maiores dimensões dos poros. Relativamente às argamassas de cal hidráulica e às argamassas bastardas (argamassas de cal aérea e cimento) os comportamentos não são de fácil avaliação, uma vez que o das segundas está intimamente ligado às quantidades de cal aérea e de cimento utilizadas. Em relação à velocidade de absorção de água, nomeadamente a absorção por capilaridade, esta está relacionada com as dimensões dos poros da argamassa, e varia na razão inversa. Desta forma, as argamassas bastardas e de cal hidráulica deverão apresentar velocidades de absorção superiores às aquelas apresentadas por argamassas de cal aérea, baseado neste pressuposto. Alguns autores confirmam esta tendência em alguns trabalhos de investigação [29, 41, 52].

Relativamente à secagem das argamassas, é esperado que as argamassas de cal aérea apresentem uma secagem mais rápida, devido à maior difusividade de vapor de água que a utilização deste ligante apresenta [37, 38, 31]. A maior difusividade apresentada pelas argamassas de cal aérea está relacionada com a maior porosidade associada a este tipo de ligante. Às argamassas de cal aérea seguem-se as argamassas de cal hidráulica e argamassas bastardas.

O traço da argamassa tem também influência na quantidade de água absorvida, no sentido em que a absorção, ou pelo menos o seu limite, será maior à medida que o traço também aumenta para argamassas à base de cal. Assim, com o aumento da quantidade de ligante utilizado aumentará também a água de amassadura necessária, e consequentemente a porosidade da argamassa. Esta observação torna-se pertinente relativamente às argamassas à base de cal, pois neste trabalho de investigação existe diferença no traço utilizado nas argamassas de cal aérea (1:2) e nas argamassas de cal hidráulica (1:3), e como tal, a avaliação dos resultados dos ensaios destas argamassas deverá ter em atenção este facto. Relativamente às argamassas bastardas, é interessante avaliar as diferenças entre estas argamassas e as de cal aérea e dessa forma tirar conclusões relativamente à acção da adição de cimento às argamassas de cal aérea. A variação no traço, para além de alterar o valor da porosidade de uma argamassa, influencia também o tipo ou forma de porosidade ocorrente, nomeadamente a dimensão dos poros [34], facto que será abordado com maior detalhe adiante.

No que diz respeito às características de secagem, o aumento da porosidade, nomeadamente a porosidade aberta, em consequência do aumento do traço nas argamassas à base de cal, resulta num maior transporte de água e vapor de água para o exterior da argamassa, aumentando assim a sua velocidade de secagem. O efeito contrário verifica-se em argamassas de cimento, uma vez que o traço da argamassa influencia a sua porosidade de forma inversa.

2.4. Influência do agregado

O agregado pode influenciar de diversas formas as argamassas, no que diz respeito às suas características e desempenho. Os principais factores, associados ao agregado, que vão exercer influência sobre a argamassa são:

- Origem
- Forma
- Dimensão
- Granulometria

2.4.1. Origem

A origem do agregado interessa sobretudo pelas suas resistências mecânicas, que consequentemente vão influenciar as resistências da argamassa. A origem interessa também pela sua composição química, que se for semelhante à composição química do ligante pode, atenuar a descontinuidade que se verifica na ligação ligante-agregado, tornando-o mais resistente [32, 34].

Em relação às características de humedecimento e secagem, a origem do agregado não terá grande influência. Poder-se-á admitir que se a composição do ligante for semelhante à do agregado, a ligação entre os dois será mais forte e coesa e promoverá a compacidade da argamassa, tornando-a assim menos porosa, principalmente nas zonas de interface. Alguns autores concluíram que as zonas de interface são zonas com particular importância na porosidade das argamassas [32, 34, 43, 50] e desta forma, com um agregado de composição semelhante ao ligante, a argamassa tenderá a absorver uma menor quantidade de água.

2.4.2. Forma

A forma do agregado, abordada por alguns autores em trabalhos de investigação anteriores, revelou influenciar sobretudo as resistências mecânicas, e a porosidade, exibidas pelas argamassas [32, 34]. As argamassas produzidas com agregado de formas angulares exibem maiores resistências que aquelas produzidas com agregado de forma arredondada. Os agregados de forma angular parecem originar uma melhor disposição na argamassa, um melhor preenchimento do espaço, obtendo assim uma argamassa mais coesa e parecem promover também uma melhor adesão com o ligante, aumentando desta forma as resistências mecânicas.

Relativamente à porosidade, a utilização de agregados de forma arredondada pode levar à formação de poros de grandes dimensões, contrariamente ao que se passa para a utilização de agregados de forma angulosa. Mais uma vez esta situação deve-se à ligação mais fraca existente entre o ligante e o agregado, originando assim a formação destes poros e levando a uma redução nas suas resistências [32]. No entanto, em termos de valores globais de porosidade, Lanas *et al.* [32, 34] mostraram no seu trabalho de investigação que os agregados de forma angular apresentam valores mais elevados de porosidade face a agregados semelhantes de forma arredondada.

2.4.3. Dimensão

A dimensão do agregado influencia principalmente a porosidade da argamassa, sendo que trabalhos realizados anteriormente mostram que o uso de agregados mais finos leva a aumentos na porosidade da argamassa [44]. Podem ser identificadas nas argamassas 3 tipos de zonas distintas: o espaço ocupado pelo agregado, o espaço ocupado pelo ligante e o espaço correspondente à ligação entre os dois espaços anteriores, ou seja, a interface entre os dois componentes. O espaço ocupado pelo ligante e a interface entre este e o agregado constituem as zonas mais porosas das argamassas. Nestas zonas, principalmente no espaço ocupado pelo ligante, formam-se normalmente fissuras, que podem ser limitadas pelo uso de agregados de maiores dimensões. Este facto origina que as argamassas com este tipo de agregados obtenham valores estáveis de porosidade e também apresentem melhores valores de resistências mecânicas a longo prazo. O uso

de agregados maiores contribui para a estabilidade do volume da argamassa, ocorrendo desta forma menor retracção aquando da secagem [44, 50].

O uso de agregados grossos contribui para o aumento das resistências mecânicas das argamassas [44]. A sua dimensão ajuda a impedir a progressão das fissuras que se desenvolvem e como normalmente a resistência é bastante superior à resistência do ligante, o agregado constitui grandes zonas de elevada resistência, devido à sua elevada dimensão.

As argamassas contendo agregados finos necessitam de maiores quantidades de água para obter a trabalhabilidade desejada e tal facto vai influenciar a retracção que se verifica aquando da sua secagem, para além da porosidade das argamassas aumentar devido ao aumento de água. Este facto vai originar redução nas resistências mecânicas das argamassas. O aumento de água necessário irá incrementar os valores de porosidade, originando desta forma que a quantidade de água possível de absorver seja maior.

No entanto, trabalhos anteriores demonstraram que as argamassas contendo agregados de maior dimensão possuem valores de absorção de água por capilaridade mais elevados, comparativamente aos valores apresentados por argamassas com agregados finos [40].

2.4.4. Granulometria

A granulometria do agregado é bastante importante numa argamassa. Uma adequada granulometria do agregado permite à argamassa atingir maiores resistências e dotar a argamassa de uma maior estabilidade volumétrica. As melhores resistências mecânicas das argamassas são obtidas pelo adequado preenchimento da argamassa por partículas do agregado, de variadas dimensões, que contribuem para a coesão e distribuição uniforme pela argamassa, contribuindo assim para o aumento da resistência conferida pelo agregado. Alguns trabalhos mostram que a utilização de agregados que possuam na sua granulometria partículas superiores a 2mm exibem menores resistências mecânicas do que aqueles que possuam partículas inferiores [32, 34]. No entanto, existem

investigações onde esta ideia não se confirma, sugerindo que esta tendência depende, em parte, das percentagens usadas das partículas com diferentes dimensões [50]. Esta redução na resistência aquando da inclusão de partículas superiores a 2mm pode dever-se ao facto de ser mais difícil garantir uma adequada coesão ou envolvimento deste tipo de partículas pelo ligante, devido à sua elevada superfície, originando assim pontos fracos nos locais onde se encontram.

A questão da granulometria das areias é um pouco complexa; não só depende das dimensões máxima e mínimas das partículas de areia, como está também ligada às percentagens das várias dimensões das partículas. Desta forma não é possível estabelecer uma curva granulométrica óptima, ou ideal, mas sim definir limites inferiores e superiores para a obtenção de um intervalo de granulometria mais adequado. Existem normas e documentos que estabelecem algumas percentagens das várias dimensões das partículas de areia, bem como de limites definidores do intervalo de granulometria, com base em experiências e resultados obtidos.

2.5. Influência da água no comportamento das argamassas

A água de amassadura utilizada na execução de argamassas altera as suas características enquanto fresca e também as características obtidas aquando do seu endurecimento. Para além de ser necessária para garantir uma trabalhabilidade adequada e promover o envolvimento entre o ligante e o agregado, no caso dos ligantes hidráulicos é também necessária para desencadear as reacções que originam o endurecimento da argamassa [39].

A primeira função que a água desempenha nas argamassas é a de garantir uma boa adesão entre o ligante e as partículas de agregado. Desta forma é necessário que a quantidade de água seja suficiente para humedecer o agregado, ou seja, mesmo depois do agregado absorver uma parte da água continue molhado na superfície. Este humedecimento do agregado é bastante importante para a sua adesão ao ligante, que caso contrário se revela deficiente.

Para além da função referida atrás, a água tem de ser em quantidade suficiente para que humedeça suficientemente as partículas de ligante, a fim de promover a adesão entre elas e também ao agregado. Nos ligantes hidráulicos, como já foi referido, tem de ser também suficiente para ser consumida nas reacções de hidratação de alguns componentes, caso contrário as reacções não são convenientemente desenvolvidas.

Referidos estes dois aspectos, torna-se óbvio que se alguma das funções não for devidamente alcançada, tal vai ter implicações significativas nas resistências mecânicas das argamassas. Acontece que para se obter uma trabalhabilidade minimamente aceitável das argamassas é necessário utilizar uma quantidade de água bastante superior àquela necessária para executar as funções referidas acima.

A água adicional que se junta às argamassas para se obter trabalhabilidade desempenha a terceira função. Esta quantidade de água, em conjunto com as restantes quantidades referidas, tem uma grande influência em termos de resistências mecânicas e porosidade nas argamassas, mais precisamente a relação entre a quantidade de água e de ligante. Esta relação denomina-se índice água/ligante.

Quanto maior for o índice água/ligante, maior é a quantidade de água que uma determinada argamassa possui. Trabalhos anteriores mostram que quanto mais finas são as partículas sólidas das argamassas, maior é a quantidade de água necessária empregar nas argamassas e, portanto, maior é o índice água/ligante [44]. O índice água/ligante pode variar também em função da trabalhabilidade que é necessária dar às argamassas, por razões de facilidade de aplicação, tipo de suporte, entre outras razões. Quando as argamassas frescas são aplicadas, ganham presa e iniciam o endurecimento ainda com água no seu interior.

A maioria da porosidade de uma argamassa tem origem na secagem do excesso de água de amassadura presente no seu interior. Esta secagem origina que o espaço anteriormente ocupado pela água passe a ser ocupado pelo ar [2, 52]. Normalmente, a água no interior da argamassa está interligada, e portanto, a secagem dessa água origina uma porosidade com bom grau de conexão e ligação ao exterior. Através desta explicação é fácil perceber que a quantidade de água tem um papel determinante no grau de porosidade de uma argamassa. Um aumento na água utilizada na execução de

argamassas tem como consequência um aumento da porosidade total da argamassa, bem como no tamanho dos poros [2, 31, 40, 53].

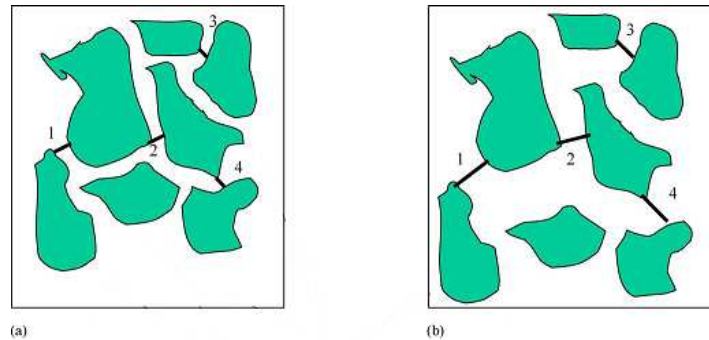


Figura 2.1. - Esquema de arranjo de partículas sólidas de uma argamassa e respectiva porosidade.

a) Baixo índice água/ligante; b) Elevado índice /água ligante [2]

O aumento do índice água/ligante, ao fazer aumentar a porosidade das argamassas, origina consequências nas resistências mecânicas. Trabalhos realizados mostram que, à medida que o índice água/ligante cresce, existe uma tendência para as resistências das argamassas, bem como o módulo de elasticidade, diminuírem [40, 49, 52].

No que diz respeito ao humedecimento e secagem, a quantidade de água utilizada desempenha um papel determinante na performance das argamassas. O aumento do índice água/ligante, ao originar um aumento na porosidade das argamassas, faz aumentar a quantidade de água que é possível absorver. Relativamente à velocidade de absorção, pode admitir-se que se a porosidade aumenta, nomeadamente a porosidade capilar, então as argamassas têm maior capacidade para absorver água, aumentando a velocidade de absorção [2, 52]. No entanto, é possível também que o aumento das dimensões dos poros possa tornar esta absorção mais lenta, uma vez que a velocidade de absorção capilar é inversamente proporcional ao raio dos poros das argamassas [2]. A maior velocidade de absorção de água por parte das argamassas com utilização de maior quantidade de água, referida em alguns trabalhos, pode estar também relacionada com a maior retracção que estas argamassas sofrem e que resulta em fissuração. Esta fissuração pode contribuir para o aumento de absorção de água das argamassas, e dessa forma, aumentar a velocidade de absorção capilar de água [53].

Para além disto, com o aumento da porosidade e da dimensão dos poros, as argamassas tornam-se mais permeáveis e a secagem também decorrerá de forma mais rápida, uma vez que fica facilitado o contacto do ar com o interior das argamassas [31, 53].

2.6. Influência da utilização de um introdutor de ar

Como já foi mencionado no ponto 2.2.4., um introdutor de ar é um adjuvante que pode ser adicionado às argamassas. Este tipo de adjuvante é utilizado quando se pretende aumentar a quantidade de vazios no interior das argamassas. Os introdutores têm como principal objectivo actuar durante o período de funcionamento das argamassas, ou seja, depois de aplicadas. No entanto, a sua utilização faz-se sentir ainda durante a execução das argamassas, ou seja, quando estas se encontram frescas. Normalmente um introdutor de ar tem o efeito de aumentar a trabalhabilidade e diminuir a densidade das argamassas frescas [47, 48]. Este facto deve-se à formação de espaços vazios de reduzidas dimensões que se formam nas argamassas, quando o adjuvante se aplica, que diminuem o atrito entre as partículas, aumentando desta forma a fluidez da mistura.

A utilização de introdutores de ar decorreu da necessidade de melhorar os betões relativamente às acções de gelo-degelo da água presente no seu interior [8]. A água absorvida pelos betões e argamassas, quando gela sofre um aumento de volume de cerca de 9%. Este aumento de volume origina o desenvolvimento de tensões na estrutura dos betões e argamassas, que geralmente não origina degradações numa fase inicial, mas sim com a continuidade de ocorrência deste tipo de ciclos. Os espaços vazios, usualmente designados de bolhas de ar, que se formam pela utilização destes produtos são os responsáveis pelo aumento da durabilidade [8]. Os poros que se formam no interior dos betões e argamassas fazem com que não se verifiquem valores tão elevados de pressão, e a estrutura não sofra tantos danos como acontece em situações de sua não utilização.

Para além da função principal de aumentar a durabilidade dos betões e argamassas relativamente aos ciclos de gelo-degelo, os introdutores de ar alteram outras características e propriedades, e são utilizados em muitas ocasiões também por esta razão. Habitualmente os introdutores de ar têm a capacidade de reduzir o efeito de

capilaridade nas argamassas, pois os poros que estes originam não são do tipo capilar, mas consistem na formação de espaços vazios aproximadamente esféricos de grandes dimensões que impedem a progressão de água. O mecanismo de capilaridade das argamassas é controlado pelo diâmetro dos poros, razão pela qual este efeito de limitação se verifica. Para além da absorção de água por capilaridade ser menor com a utilização deste tipo de produtos, a própria velocidade de absorção de água por este meio é menor [10]. Isto acontece, principalmente, pelo facto da porosidade originada por este tipo de produtos não apresentar uma conexão entre os vários poros tão boa como aquela que se verifica com a porosidade resultante da secagem da água de amassadura, consistindo neste caso na formação de poros individualizados. Associada a esta redução no efeito de capilaridade das argamassas, junta-se também uma redução da permeabilidade [8, 11].

A utilização de um introdutor de ar leva, naturalmente, a um aumento da porosidade das argamassas e, como consequência, as suas resistências mecânicas baixam [47, 48]. Alguns autores apontam reduções de 10% e 15% nas resistências de flexão e compressão, respectivamente. Para além deste aumento de porosidade geral, verifica-se que a utilização de um introdutor de ar origina o aparecimento de poros de grandes dimensões [10], como já referido. São mencionadas, em outros trabalhos, dimensões de poros de 5 μ m a 1mm, com a maior parte das dimensões compreendidas entre 20 μ m e 200 μ m [8, 10].

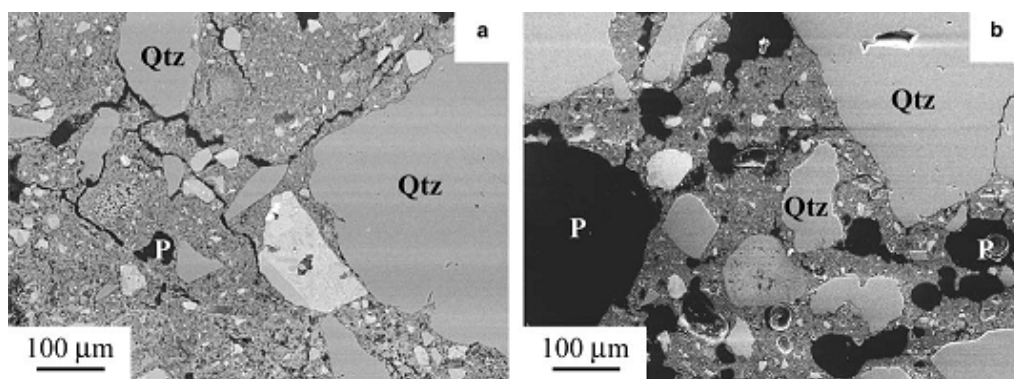


Figura 2.2. - Imagens microscópicas das estruturas de argamassas à base de cal aérea: a) Sem introdutor de ar; b) Com introdutor de ar [10]

Pelos factos referidos anteriormente, pode afirmar-se que relativamente ao humedecimento das argamassas, a utilização de um introdutor de ar origina uma

redução da velocidade de absorção de água por capilaridade, para além de reduzir também a quantidade de água absorvida [10]. No entanto, a quantidade de resultados observados não é suficientemente extensa para estabelecer relações e comportamentos relativos à utilização deste tipo de produtos. A discussão sobre o seu efeito nas argamassas está bastante discutida, mas a realização de desenvolvimentos experimentais que permitam tirar conclusões sólidas sobre o humedecimento são ainda escassos.

No que diz respeito à secagem, uma diminuição da permeabilidade das argamassas tende a indicar uma diminuição da velocidade de secagem. No entanto, G. Cultrone *et al.* [10] obtiveram resultados contrários a esta ideia, revelando velocidades de secagem maiores em argamassas com introdutor de ar. Mais uma vez, neste campo a informação existente é escassa, não permitindo o estabelecimento sólido de relações e comportamentos.

2.7. Influência da compactação das argamassas

A realização de operações de compactação durante a realização de argamassas, neste trabalho de investigação, leva a que se façam algumas considerações relativas a este procedimento. É de referir que este tipo de procedimento não constitui uma obrigatoriedade na execução de argamassas, e por isso não vem referido na norma europeia de execução de argamassas. Ainda assim, neste trabalho de investigação adoptou-se este procedimento aquando da moldagem dos provetes prismáticos. Durante a moldagem dos provetes procedeu-se a duas compactações de 20 pancadas cada uma, a primeira quando se encheu metade dos moldes e a segunda quando se encheu o restante espaço do molde.

É importante referir que o procedimento de compactação altera de forma substancial as características e o comportamento geral das argamassas. Alguns trabalhos mostram a influência que a compactação de argamassas exerce no seu desempenho, como por exemplo relativamente à porosidade, resistências mecânicas e absorção de água por capilaridade. Em primeiro lugar, a compactação permite que as argamassas reduzam a sua porosidade e este facto reflecte-se depois no seu comportamento em geral, pois a porosidade constitui uma das características mais importantes que controla o

comportamento das argamassas [8]. A redução da porosidade origina um aumento das resistências mecânicas, podendo contribuir para a durabilidade das argamassas. Ensaio de absorção de água por capilaridade efectuados a argamassas semelhantes, mas com diferentes graus de compactação, permitem observar que uma argamassa compactada absorve menor quantidade de água e de forma mais lenta [50]. Os resultados destes ensaios parecem indicar que a operação de compactação de argamassas origina uma alteração significativa da porosidade, quer na sua quantidade, como na dimensão e conexão dos diferentes poros.

2.8. Influência da cura

A cura das argamassas é importante para o desempenho das argamassas. Vários estudos mostram que diferentes tipos de cura originam características e comportamentos distintos nas argamassas. No entanto, a aplicação de processos de cura semelhantes a argamassas de diferentes tipos revela-se adequada somente para algumas dessas argamassas. Desta forma, a comparação entre os vários parâmetros de argamassas deve ter em conta o tipo de cura a que foram submetidas, para se efectuar uma comparação mais precisa entre argamassas.

O processo de endurecimento e o desenvolvimento de resistências mecânicas estão associados a processos de carbonatação e/ou hidratação. Durante estes dois processos a cura é bastante importante, nomeadamente, as condições a que se dá. Normalmente, a cura é controlada em relação a dois parâmetros: temperatura e humidade relativa.

A temperatura, influenciando a humidade relativa e, por isso, o limite de saturação do ar, é importante para controlar a velocidade de evaporação da água e pode ser bastante importante em argamassas com componentes que necessitem de reagir com a água para desenvolver reacções que levam ao endurecimento e desenvolvimento de resistências mecânicas, como é o caso de argamassas à base de cal hidráulica ou cimento. Ou seja, o aumento da temperatura resulta em diminuição da humidade relativa e num aumento do limite de saturação do ar e promove a evaporação acelerada da água das argamassas. Desta forma pode prejudicar as reacções dos componentes, dando-se estas de forma deficiente (ou mesmo não se dando) e resultar em argamassas com menores resistências

mecânicas. No entanto, para argamassas cujo processo predominante de endurecimento seja a carbonatação, uma mais rápida evaporação da água (dentro de certos limites) é benéfica, pois aumenta a velocidade do processo de carbonatação.

No entanto, a humidade relativa parece ser a condição que tem uma maior influência na cura das argamassas, principalmente a longo prazo. Estudos indicam que as argamassas de ligantes aéreos sujeitas a ambientes com humidades relativas próximas de 60% apresentam taxas de carbonatação superiores, aumentando assim as suas resistências mecânicas mais rapidamente [33]. Para argamassas de ligantes hidráulicos, humidades relativas mais elevadas são mais favoráveis pois permitem uma melhor hidratação dos seus componentes.

A título de exemplo, M. Arandigoyen e J.I. Alvarez [3] apontam que ambientes de cura com temperatura de $20\pm 5^{\circ}\text{C}$ e humidade relativa de $60\pm 10\%$ são mais favoráveis a argamassas ricas em cal aérea do que para argamassas ricas em cimento.

2.9. Porosidade das argamassas

A porosidade de uma argamassa é definida como o espaço no interior da argamassa que é preenchido por ar. Este ar resulta na sua maioria da evaporação da água utilizada na sua amassadura, mas também do ar que fica contido no interior aquando da mistura dos vários componentes e da aglomeração de algumas partículas sólidas.

Ao longo deste capítulo é possível observar que a porosidade é um dos factores mais importantes, senão o mais importante, no comportamento das argamassas e desempenha um papel determinante na sua durabilidade. Várias especificações das argamassas associados a materiais e procedimentos alteram na maioria das vezes a porosidade das argamassas e consequentemente alteram bastante as suas propriedades e comportamentos, como absorção de água, permeabilidade, susceptibilidade às degradações, resistências mecânicas, entre outros.

A porosidade das argamassas não é homogénea e existem diferentes tipos de poros no seu interior. As principais diferenças que podem existir entre poros são: a sua interligação com outros poros, a forma e as dimensões.

2.9.1. Interligação dos poros

Se determinados poros não têm ligação com outros poros e constituem um sistema fechado, então a porosidade por eles formada designa-se porosidade fechada. Esta porosidade é de acesso muito difícil, ou mesmo impossível, por parte da água e a evaporação da água que por vezes fica acumulada nestes poros é bastante lenta. Se por outro lado os poros estão bem interligados uns com os outros e têm ligação com o exterior, a porosidade por eles formada designa-se de porosidade aberta. A porosidade aberta constitui o tipo de porosidade mais importante no desempenho global das argamassas, uma vez que para além de influenciar as propriedades e comportamentos que a porosidade fechada influencia, estes poros influenciam também o transporte e circulação de água nas argamassas, bem como a secagem dessa mesma água e transporte de vapor, uma vez que são estes que fazem a ligação com o exterior, criando assim condições de evaporação.

A porosidade aberta resulta, na sua maioria, do excesso de água das argamassas que é necessário para a amassadura dos vários componentes. Uma grande parte da água das argamassas está continuamente interligada e é esta continuidade que é responsável pela conexão dos poros, pois estes consistem no espaço que é ocupado pela água. É através da porosidade aberta que se processa a absorção de água nas argamassas e esta porosidade é responsável também pela maior parte da permeabilidade das argamassas.

2.9.2. Forma da porosidade

A porosidade presente nas argamassas pode assumir várias formas, das quais as principais e com maior influências são: esféricas, cilíndricas e do tipo fissura. A origem destas porosidades é mais ou menos bem conhecida e normalmente cada uma delas está associada a um factor distinto.

A porosidade de forma esférica resulta, normalmente, do ar aprisionado nas argamassas durante a mistura ou aplicação, ou da utilização de produtos introdutores de ar. Normalmente este tipo de porosidade não tem uma boa conexão e consiste em poros mais ou menos individualizados no interior das argamassas ou junto às faces das argamassas. Este tipo de porosidade não favorece a absorção de água por capilaridade fundamentalmente devido a estes poros possuírem normalmente grandes dimensões e devido à baixa conexão, que origina também uma redução na permeabilidade das argamassas.

A porosidade de forma cilíndrica tem origem no espaço ocupado pelo excesso de água de amassadura e assume esta forma devido à sua elevada conexão formando diversos canais pelas argamassas. Estes poros formam a maioria da porosidade das argamassas e são os que mais influenciam a absorção de água por capilaridade das argamassas, bem como a sua permeabilidade.

A porosidade do tipo fissura tem origem, principalmente, na retracção que as argamassas sofrem aquando da sua secagem [37]. A porosidade do tipo fissura é mais comum nas argamassas de cal aérea pois estas possuem resistências mecânicas inferiores, cedendo o material com maior facilidade. Este tipo de porosidade está relacionado com diversos factores como, o índice água/ligante, o índice ligante/agregado e também as dimensões do agregado. Relativamente ao comportamento, contribui de forma importante para a absorção de água por capilaridade fazendo aumentar a quantidade total de água absorvida e melhorando a conexão entre a restante porosidade. Também a permeabilidade é favorecida com o aumento desta porosidade [37].

2.9.3. Dimensões dos poros

Relativamente às dimensões, podem dividir-se os poros das argamassas em 3 tipos, de forma simplificada. Esta divisão não é completamente consensual, no entanto enquadra-se de forma aproximada nos valores habitualmente referidos na literatura. Os primeiros tipos de poros são os poros muito finos, que se caracterizam por possuir dimensões

muito reduzidas, nomeadamente o raio. Estes poros são designados na literatura estrangeira como “gel pores” e possuem dimensões inferiores a $0,03\mu\text{m}$ [7, 52]. Normalmente, este tipo de poros constitui a menor percentagem da porosidade das argamassas. São mais frequentes e em maior quantidade nas argamassas de cimento, seguidas das argamassas de cal hidráulica e argamassas de cal aérea [3, 52]. O segundo tipo de poros corresponde a poros de maiores dimensões mas ainda assim reduzidas, compreendidas entre $0,03\mu\text{m}$ e $10\mu\text{m}$ [7, 52]. Estes poros resultam do espaço que é deixado livre pela secagem da água de amassadura. Uma vez que formam canais na argamassa e são os principais responsáveis pela absorção de água por capilaridade, designam-se por poros capilares. Os poros capilares constituem a maior percentagem de porosidade das argamassas. O terceiro tipo de poros são os poros de grandes dimensões e a sua origem está relacionada com vários factores como, tipo de ligante, índice água/ligante, tipo e quantidade de agregado e podem também ter origem e corresponder aos poros causados pelo ar aprisionado na argamassa durante a mistura ou aplicação, ou então devido à utilização de introdutores de ar. Estes poros possuem dimensões superiores a $10\mu\text{m}$ [52]. Normalmente, os poros de grandes dimensões constituem a maior percentagem de porosidade das argamassas, a seguir aos poros capilares. Este tipo de poros é mais frequente e em maior quantidade nas argamassas de cal aérea, seguidas das argamassas de cal hidráulica e argamassas de cimento [3, 38, 52].

A dimensão dos poros é particularmente importante na absorção de água por capilaridade das argamassas, pois esta absorção é controlada pelo diâmetro da porosidade, fenómeno que é abordado no ponto 2.10. A dimensão dos poros afecta também a permeabilidade das argamassas, sendo estas mais permeáveis com o seu aumento, o que indicia uma maior velocidade de secagem.

2.9.4. Mecanismos de degradação relacionados com a porosidade

O presente trabalho pretende obter informação relevante sobre o desempenho de argamassas no que diz respeito ao humedecimento e secagem, pelo que se torna importante a análise de aspectos de durabilidade. Neste âmbito, faz sentido abordar os mecanismos de degradação mais frequentes e importantes, relacionados com a porosidade, que afectam as argamassas e abordar também de que forma um melhor

conhecimento das características de humedecimento e secagem pode contribuir para melhorar a durabilidade. É unanimemente aceite, e um tema bem desenvolvido, que a porosidade tem relação directa com as resistências mecânicas das argamassas. Mais precisamente, as resistências mecânicas variam na razão inversa da porosidade. Pode apontar-se como excepção a esta regra as argamassas de cal aérea, cuja porosidade aumenta com o aumento da quantidade de cal, e as suas resistências mecânicas aumentam também. Mas até neste caso esta situação tem um limite, como foi abordado por J. Lanas e J.I. Alvarez [34] num dos seus trabalhos de investigação.

Contudo, a degradação das argamassas vai para além das simples solicitações em que somente intervêm as resistências mecânicas das argamassas. As argamassas estão também sujeitas a outro tipo de agressões que originam a sua degradação, das quais as mais importantes são: ciclos de gelo/degelo, ciclos de cristalização/dissolução de sais, ataque por sulfatos, entre outras.

2.9.4.1. Degradação por ciclos de gelo/degelo

As degradações devidas a ciclos de gelo/degelo foram já abordadas no ponto 2.6.. Ainda assim não é demais referir que este tipo de degradação tem origem na água absorvida pelas argamassas, que a baixas temperaturas corre o risco de solidificar, sendo que esse fenómeno tem associado um aumento de volume que causa um aumento de tensões na estrutura das argamassas, levando à rotura do material. Este tipo de acção é mais importante nas argamassas com maiores coeficientes de saturação e nos poros de pequenas dimensões, pois são estes os primeiros a ficarem saturados com água [39].

O humedecimento e a secagem das argamassas desempenham um papel relevante no aumento da durabilidade relativamente a estas agressões. Assim, uma limitação no efeito de capilaridade das argamassas pode contribuir para diminuir o seu coeficiente de saturação, bem como na velocidade de absorção de água, sendo que para este efeito a utilização de um introdutor de ar pode revelar-se importante. Relativamente à secagem, as argamassas com melhor permeabilidade deverão secar mais rapidamente e desta forma diminuem a sua saturação, baixando consequentemente as tensões que eventualmente se desenvolvam no seu interior. Relativamente a este aspecto, as argamassas de cal aérea são as que exibem um melhor comportamento.

2.9.4.2. Degradação por ciclos de cristalização/dissolução

A degradação devido a ciclos de cristalização/dissolução de sais actua de forma semelhante à dos ciclos gelo/degelo, ou seja, por expansão de material que cria tensões na estrutura das argamassas. Acontece que neste caso a expansão não é controlada simplesmente pela acção da temperatura, mas está associada à acção da humidade relativa. A presença de sais nas argamassas pode ter diversas origens, desde sais presentes na água de amassadura, materiais da argamassa com sais na sua composição, proximidade de ambiente marítimo, absorção de água do terreno com sais dissolvidos, entre outras. Os sais vão chegar ao interior das argamassas dissolvidos em soluções líquidas. A cristalização é controlada pela humidade relativa como já referido, ou seja, existe uma determinada gama de valores de humidade relativa que marca a fronteira entre a dissolução e a cristalização dos sais. Com uma humidade relativa superior a essa gama os sais vão ser dissolvidos e circular pela estrutura porosa das argamassas e para valores inferiores a essa gama os sais vão cristalizar e consequentemente aumentar o seu volume. São justamente estes ciclos de cristalização/dissolução, e os ciclos de tensão por pressão interna associados, os responsáveis pela degradação das argamassas.

As argamassas com menores valores de porosidade e absorção de água limitam o acesso de sais ao seu interior. As argamassas de cimento enquadram-se neste perfil, no entanto, como os seus poros são em geral de pequenas dimensões e estas argamassas são pouco permeáveis, os sais vão permanecer mais tempo no seu interior e desenvolver tensões mais elevadas na estrutura, o que pode provocar importantes degradações [39]. No entanto, S. Pavia e E. Tracy [41] mostraram no seu trabalho que as argamassas de cimento apresentam um bom comportamento a este tipo de agressão muito por causa das suas elevadas resistências mecânicas. Para além disso, os mesmos autores mostraram também que as argamassas de cal aérea se revelaram mais resistentes que as de cal hidráulica, pensa-se que devido ao facto de possuírem poros de maiores dimensões que vão diminuir as tensões geradas pelos sais cristalizados revelando-se por isso mais duráveis.

2.9.4.3. Degradação por ataque de sulfatos

Outro tipo de degradação relacionado com a estrutura porosa das argamassas é o ataque de sulfatos. Estes sais podem ter várias origens: gases, partículas sólidas, dissolução em água e podem estar também presentes na própria argamassa. Quando estes sulfatos estão

em contacto com as argamassas podem reagir com alguns dos seus constituintes e dar origem à formação de sais e outros produtos que são facilmente dissolvidos e outros que provocam fenómenos expansivos. As argamassas mais sujeitas a este tipo de degradação são as de cimento, devido a alguns componentes que integram o ligante, no entanto, as argamassas de cal também estão sujeitas a estas degradações, ainda que em menor escala [39]. Trabalhos de investigação mostram que o grau de degradação por sulfatos depende do índice água/ligante, sendo maior quando aumenta este índice, depende também da porosidade e da permeabilidade das argamassas [39].

2.10. Absorção de água por capilaridade

As argamassas são materiais porosos e, tal como os restantes materiais do mesmo tipo, têm capacidade para absorver líquidos. A absorção de água pode fazer-se fundamentalmente de duas formas: devido a pressão hidráulica associada normalmente a imersão e por capilaridade.

A absorção de água através de permeabilidade associada a pressão hidráulica dá-se habitualmente quando as argamassas estão imersas, ou seja, estão totalmente em contacto com a água e a absorção é feita através de diversas faces da argamassa, por acção da gravidade e da pressão que a água exerce no sentido de ocupar o espaço preenchido por ar. A absorção de água por capilaridade caracteriza-se por se desenvolver quando somente alguma parte das argamassas está em contacto com a água, normalmente uma ou várias das faces, e a absorção de água se desenvolve por fenómenos de sucção, em particular no sentido contrário ao da força exercida pela gravidade.

A absorção de água por capilaridade está directamente relacionada com a dimensão dos poros das argamassas, bem como com a sua conexão. A maior parte da água absorvida por este meio dá-se através dos poros capilares. Assim, o efeito de capilaridade é tanto mais forte quanto menores forem as dimensões dos poros [41]. Tal como M. Arandigoyen *et al.* [2] explicam no seu trabalho, o mecanismo de capilaridade é controlado por uma diferença de pressão (ΔP) que se forma quando um líquido entra em

contacto com os poros finos. Este fenómeno pode ser enunciado pela seguinte expressão:

$$\Delta P = \frac{2\gamma \cos \theta}{r} \quad (2.1)$$

em que:

γ – tensão de superfície do líquido

θ – ângulo de contacto

r – raio do poro

Como se pode observar através da expressão, a diferença de pressão que se forma é tanto maior quanto menor for o raio dos poros das argamassas. Desta forma, o efeito de capilaridade e a velocidade de absorção de água vão ser mais elevados. Acontece que os poros mais pequenos não são os que estão em maior número nas argamassas, mas sim os capilares, portanto, normalmente são estes poros que vão controlar o efeito de capilaridade das argamassas. Trabalhos de investigação mostraram que argamassas semelhantes com diferentes quantidades de água alteram a absorção de água por capilaridade. O aumento da quantidade de água origina um aumento na porosidade, bem como na dimensão dos poros; no entanto a velocidade de absorção de água nestas argamassas é maior do que naquelas com menor quantidade de água [2]. Este facto explica-se com base no aumento geral da porosidade, que origina uma maior absorção de água, aumentando assim a velocidade e para além disso, parece que entre poros capilares as diferenças de dimensão originadas não são suficientes para resultar num abaixamento de velocidade de absorção. Aliás, trabalhos desenvolvidos por diversos autores mostram que o aumento das dimensões dos poros origina um aumento da velocidade de absorção de água por capilaridade numa primeira fase.

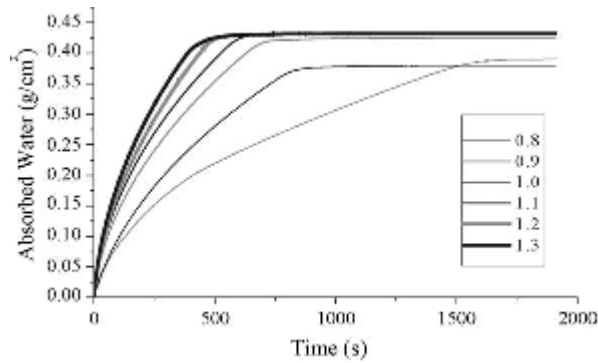


Figura 2.3. – Gráfico de absorção de água por capilaridade em pastas de cal aérea com diferentes índices água/ligante [2]

Desta forma, e de acordo com o que se sabe relativamente à porosidade dos vários tipos de argamassas, o efeito de capilaridade, em termos globais, é mais forte nas argamassas de cimento, pois estas argamassas têm os poros com dimensões mais reduzidas, seguidas das argamassas de cal hidráulica e cal aérea [29, 43]. Relativamente às argamassas de cal aérea e de cal hidráulica, o efeito de capilaridade não pode ser abordado de forma tão linear uma vez que é bastante afectado em função do tipo de cal que se use e também do agregado. A mesma nota serve também para o que diz respeito ao valor assintótico de absorção. O trabalho desenvolvido por V. M. Rato [43] mostra esta ideia mesmo.

2.11. Difusão de vapor de água

A difusão de vapor de água pela estrutura das argamassas é um dado importante para a avaliação do comportamento das argamassas. Com esta informação é possível avaliar o transporte de humidade através das argamassas e caracterizá-lo, ou seja, é possível observar quanto tempo leva a estabelecer-se um regime constante de fluxo de vapor de água pela estrutura porosa e quantificar esse fluxo.

Estes dados são especialmente importantes para se efectuar uma avaliação do comportamento de secagem das argamassas, que em grande parte funciona por fenómenos de difusão de vapor pelos poros [43]. A difusão de vapor de água é também um importante indicador de durabilidade nas argamassas, por exemplo no que diz respeito à susceptibilidade de ataque por sulfatos. As argamassas com menores valores

de difusão de vapor de água estão mais sujeitas a este tipo de ataques, pois aqueles iões permanecem durante mais tempo no seu interior [38].

O fenómeno de difusão de vapor de água dá-se através da estrutura porosa da argamassa, mais precisamente através da porosidade aberta e com boa conexão entre os diversos poros. A difusão de vapor de água em argamassas pode ser caracterizada pela lei de Fick, que se traduz pela seguinte expressão:

$$Q = D \frac{A \cdot \Delta C}{l} \cdot t \quad [\text{g}] \quad (2.2)$$

em que:

D – coeficiente de difusão de vapor de água [m^2/s]

Q – massa do conjunto de ensaio [g]

l – espessura do provete [m]

A – área do provete [m^2]

ΔC – gradiente de concentração [g/m^3]

t – tempo [s]

No trabalho realizado por Mosquera *et al.* [37] obtiveram-se resultados que evidenciam que as argamassas de cal aérea são aquelas que estabelecem um regime constante de fluxo mais rapidamente, seguindo-se as argamassas de cal hidráulica e finalmente as argamassas de cimento. As argamassas bastardas situam-se, tal como as argamassas de cal hidráulica, entre os dois extremos. Também os valores do coeficiente de difusão de vapor de água são maiores nas argamassas de cal aérea, seguidos dos valores das argamassas de cal hidráulica e bastardas e finalmente dos valores das argamassas de cimento. O coeficiente de difusão das argamassas de cal aérea é, normalmente, bastante superior ao das restantes argamassas de diferentes ligantes. Pensa-se que este facto está, em parte, relacionado com as fissuras que habitualmente se formam nas argamassas com este ligante, como referido. Ainda no mesmo trabalho, Mosquera *et al.* confirmam esta ideia.

Assim, pode assumir-se que existe uma relação directa entre a porosidade aberta e também as dimensões e conexão dos poros do material e a difusão de vapor de água

numa argamassa, aumentando o coeficiente de difusão quando aumenta também a porosidade aberta [37, 38]. Como já foi abordado nos pontos anteriores, a porosidade aberta está ligada predominantemente aos poros originados pela secagem da água de amassadura das argamassas e como tal é de esperar que as argamassas com recurso a maior quantidade de água apresentem coeficientes de difusão de vapor de água superiores e portanto exibam melhor comportamento de secagem.

3. Desenvolvimento experimental

O presente capítulo tem como objectivo descrever as várias fases do desenvolvimento experimental efectuado.

Começa por ser abordada uma primeira etapa do desenvolvimento experimental relacionada com os vários materiais utilizados, a execução das várias amassaduras das diferentes argamassas, execução de provetes e seu acondicionamento. Nesta fase são também descritos os ensaios prévios realizados, quer na fase anterior à execução das argamassas, quer também durante a sua fase de execução. São descritos todos os procedimentos executados para um conhecimento em pormenor sobre todo o processo de obtenção dos provetes até à fase de execução de ensaios dos provetes das diferentes argamassas.

Posteriormente é abordada a fase de execução dos diferentes ensaios executados com os provetes endurecidos depois do período de cura, em que se descrevem os vários ensaios realizados com todas as etapas em pormenor. Esta informação é útil para se entender melhor os vários resultados obtidos nos diferentes ensaios e poder correlacioná-los com a informação já existente, de modo a possibilitar a obtenção de conclusões.

3.1. Procedimentos experimentais de preparação de provetes

3.1.1. Análise de materiais

3.1.1.1. Areias

No desenvolvimento experimental foram utilizados 3 tipos de areias diferentes: uma areia de rio corrente e duas areias com características de granulometria controlada. A principal diferença entre as várias areias é a dimensão das partículas. Assim, por ordem decrescente de dimensão média das areias, bem como de granulometria, foram utilizadas:

- Areia AGS 1/2
- Areia de rio
- Areia FPS 120



Figura 3.1. – Areias utilizadas na execução das argamassas: AGS 1/2, Rio e FPS 120 (da esquerda para a direita)

As areias AGS 1/2 e FPS 120 são areias comercializadas em saco, sujeitas a controlo das características como granulometria, constituição, entre outras. Estas areias são essencialmente siliciosas e são previamente lavadas.

A areia de rio é uma areia normalmente utilizada nos trabalhos de construção correntes, que apresentava bastantes impurezas, bem como alguma mistura de areia de areeiro, com composição algo argilosa. A composição da areia de rio é maioritariamente siliciosa, tal como acontece com as outras duas areias. Esta é uma areia naturalmente lavada e que se situa entre as outras duas areias, no que diz respeito a granulometria. Não houve lugar a qualquer peneiração ou preparação da areia para o posterior uso no trabalho. Aquando do uso desta areia houve somente o cuidado de retirar as maiores impurezas (alguns pedaços de madeira, pedras, entre outras), evitar o uso de areia misturada e retirar alguns torrões que por vezes existiam.

A razão de utilização de 3 tipos de areia diferentes prende-se, sobretudo, com a avaliação da dimensão do agregado e a granulometria no comportamento das argamassas, uma vez que a sua composição é semelhante, isto é, as areias são essencialmente siliciosas. Desta forma, é possível fazer uma avaliação clara da diferença de desempenho associada a cada areia e ter dois limites de referência bem

definidos, associados às areias AGS 1/2 e FPS 120, sendo a primeira uma areia muito grossa e a segunda uma areia bastante fina.

3.1.1.2. Ligantes

Tal como as areias, os ligantes utilizados no desenvolvimento experimental são de 3 tipos diferentes, nomeadamente, em relação à sua constituição e origem e em relação ao tipo de reacção associada ao seu endurecimento. Assim os 3 ligantes utilizados são:

- Cal aérea
- Cal hidráulica
- Cal aérea + cimento

Cada um dos ligantes, ou mistura de ligantes, são fornecidos em sacos, sob a forma de pó. A cal aérea é uma cal hidratada em pó, a cal hidráulica é uma NHL5, também em pó e o cimento é um cimento Secil: CEMII/B-L 32,5N. Uma vez abertos os sacos, transferiu-se o conteúdo para recipientes plásticos opacos devidamente vedados.

Como referido no capítulo anterior, o comportamento das argamassas é bastante influenciado pelo tipo de ligante utilizado. Assim, a utilização de 3 tipos diferentes permite determinar qual deles apresenta melhor desempenho em relação aos vários parâmetros abordados neste trabalho e estabelecer diferenças de desempenho que permitam retirar conclusões importantes relativas ao seu uso.

3.1.1.3. Água

A água utilizada na amassadura das argamassas é água da rede pública. Para cada argamassa de constituição semelhante (entenda-se igual composição e quantidade de material sólido) são executadas duas amassaduras com quantidades de água diferentes. As quantidades de água utilizadas são as necessárias para obter um resultado no ensaio de espalhamento de 55% e 75%, respectivamente.

É sabido que a água provoca alterações nas características das argamassas, nomeadamente na estrutura porosa das mesmas e consequentemente provoca alterações no seu desempenho. Desta forma, é possível avaliar a influência que diferentes quantidades de água têm no comportamento das argamassas.

3.1.1.4. Introdutor de ar

Em algumas argamassas foi utilizado um introdutor de ar. O objectivo principal da utilização deste produto é incrementar a porosidade das argamassas e verificar que alterações no comportamento se obtêm pela sua utilização. Com a introdução deste produto é possível avaliar diferenças de comportamento entre argamassas cuja única diferença é a sua utilização ou não.

O produto utilizado é o Sika-AER[®] 5. Este produto é disponibilizado sob a forma de um líquido de tonalidade acastanhada, em recipiente de plástico opaco. A dosagem e o modo de aplicação do produto, são os recomendados pelo fabricante. No desenvolvimento experimental, a dosagem concreta de produto utilizada foi de 0,15% sobre o peso do ligante.

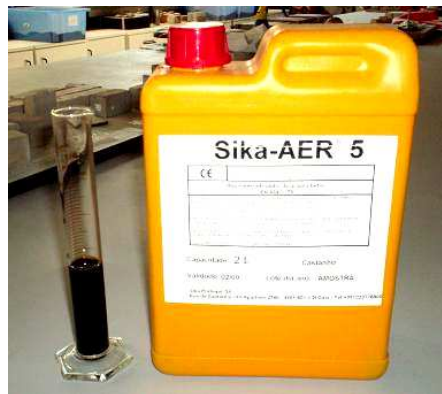


Figura 3.2. – Introdutor de ar

As informações acerca deste produto estão presentes na sua ficha técnica, que se encontra em anexo neste trabalho [Anexo 1].

3.1.2. Definição de argamassas e identificação de provetes

3.1.2.1. Definição de argamassas

As argamassas realizadas neste trabalho resultam da combinação de 3 tipos de ligante, 3 tipos de areia, 2 quantidades de água e ainda de um introdutor de ar. Como é fácil de perceber pela quantidade de combinações que é possível efectuar, estes materiais vão dar origem a uma série de argamassas diferentes.

Os ligantes utilizados no desenvolvimento experimental são: cal aérea, cal hidráulica e cal aérea+cimento. Cada ligante é combinado com cada uma das 3 areias e para cada combinação obtida são realizadas duas amassaduras diferentes, uma com uma quantidade de água suficiente para obter um resultado no ensaio de espalhamento de 55% e outra com uma quantidade de água suficiente para obter um resultado no ensaio de espalhamento de 75%.

Por exemplo, combinando a cal aérea com areia AGS 1/2 obtém-se uma das 3 combinações possíveis de efectuar com este tipo de ligante e para esta combinação realizam-se duas amassaduras distintas, assentando essa distinção na quantidade de água de cada uma, uma com menor quantidade de água (para espalhamento de 55%) e outra com maior quantidade de água (para espalhamento de 75%). Este processo é repetido para as combinações da cal aérea com a areia de rio e com a areia FPS 120.

O processo explicado atrás é aplicado para os restantes 2 ligantes. Também estes seguem as combinações já referidas. Assim, cada ligante utilizado dá origem a 3 argamassas de constituição diferente (uma argamassa para cada tipo de areia) e 6 amassaduras diferentes, uma vez que para cada constituição correspondem duas amassaduras com diferentes quantidades de água.

Por fim, são realizadas as argamassas com utilização de introdutor de ar. O processo de definição destas argamassas é diferente daquele referido acima. Assim, as argamassas com utilização de introdutor de ar resultam da combinação de 3 ligantes, 1 areia, mais precisamente areia de rio, e 2 quantidades de água, sendo que o introdutor de ar é um constituinte sempre presente nestas argamassas.

Por exemplo, combinando a cal aérea com areia de rio obtém-se uma das 3 combinações possíveis de efectuar com a areia de rio e os ligantes. Para esta argamassa realizam-se 2 amassaduras distintas, assentando essa distinção na quantidade de água de cada uma, sendo uma referida a uma quantidade de água suficiente para a obtenção de 55% no ensaio de espalhamento e a outra para a obtenção de um resultado de 75% no mesmo ensaio. Este processo é repetido para as combinações de areia de rio com os restantes dois ligantes, cal hidráulica e cal aérea+cimento. Assim, com recurso a introdutor de ar

realizam-se 3 argamassas de constituição diferente (uma argamassa para cada tipo de ligante) e 6 amassaduras diferentes, uma vez que para cada tipo de constituição são executadas 2 amassaduras com diferentes quantidades de água.

Para um entendimento mais facilitado das combinações efectuadas no trabalho e para maior facilidade de visualização das diferentes argamassas realizadas apresenta-se o quadro seguinte, em jeito de síntese:

Quadro 3.1. – Quadro de constituição de argamassas

Material constituinte			Traço	Valor de ensaio de espalhamento (quantidade de água)	Argamassas
Ligante	Agregado	Adjuvante	ligante:agregado		
Cal aérea	Areia AGS 1/2	-	1:2	55% (-)	Argamassa 1
		-	1:2	75% (+)	Argamassa 2
	Areia de rio	-	1:2	55% (-)	Argamassa 3
		-	1:2	75% (+)	Argamassa 4
	Areia FPS 120	-	1:2	55% (-)	Argamassa 5
		-	1:2	75% (+)	Argamassa 6
Cal hidráulica	Areia AGS 1/2	-	1:3	55% (-)	Argamassa 7
		-	1:3	75% (+)	Argamassa 8
	Areia de rio	-	1:3	55% (-)	Argamassa 9
		-	1:3	75% (+)	Argamassa 10
	Areia FPS 120	-	1:3	55% (-)	Argamassa 11
		-	1:3	75% (+)	Argamassa 12
Cal aérea+cimento	Areia AGS 1/2	-	1:1:6	55% (-)	Argamassa 13
		-	1:1:6	75% (+)	Argamassa 14
	Areia de rio	-	1:1:6	55% (-)	Argamassa 15
		-	1:1:6	75% (+)	Argamassa 16
	Areia FPS 120	-	1:1:6	55% (-)	Argamassa 17
		-	1:1:6	75% (+)	Argamassa 18
Cal aérea	Areia de rio	Int. de ar	1:2	55% (-)	Argamassa 19
		Int. de ar	1:2	75% (+)	Argamassa 20
Cal hidráulica		Int. de ar	1:3	55% (-)	Argamassa 21
		Int. de ar	1:3	75% (+)	Argamassa 22
Cal aérea+cimento		Int. de ar	1:1:6	55% (-)	Argamassa 23
		Int. de ar	1:1:6	75% (+)	Argamassa 24

Cada uma das 24 argamassas realizadas dá origem a dois tipos de provetes distintos (provetes prismáticos e provetes cilíndricos/circulares). Uma vez que com cada argamassa se executam 6 provetes prismáticos e 3 circulares, no total das 24 argamassas obtém-se 144 provetes em forma de prisma e 72 de forma circular.



Figura 3.3. – Provete prismático e provete circular

3.1.2.2. Sistema de identificação de provetes

Antes de se proceder aos vários ensaios a realizar com os diferentes provetes, é necessário proceder à identificação de todos eles para permitir a diferenciação entre os vários provetes e as várias argamassas. Assim, criou-se um sistema de identificação para os provetes que permite distinguir inequivocamente cada um deles.

O sistema de identificação definido para os provetes assenta num código que possui 5 parâmetros que variam em função das características do provete que se pretende identificar. O código de identificação dos provetes é composto por sequências de letras e números e a adição de um símbolo no final do código, no caso de se tratar de argamassas com introdutor de ar. Assim, o código de identificação é composto por 5 caracteres seguidos, ou 6 no caso da utilização de introdutor de ar.

Assim o primeiro parâmetro diferenciador no código é a utilização de letras minúsculas ou maiúsculas, caso a quantidade de água utilizada na amassadura seja para um valor no ensaio de espalhamento de 55% (menor quantidade de água), ou de 75% (maior quantidade de água), respectivamente. Um código é composto somente de letras minúsculas ou maiúsculas, não havendo mistura de tipos de letra diferentes num mesmo código.

Todos os provetes começam a identificação pela sequência “st” ou “ST”, sendo que a diferença entre a utilização de letra minúscula e maiúscula é a referida acima. Esta primeira sequência serve somente para identificar os provetes do presente trabalho.

Imediatamente a seguir às duas primeiras letras de identificação segue-se um número. Este número pode variar de 1 a 3 e diz respeito ao ligante utilizado na argamassa, com a seguinte correspondência:

Quadro 3.2. – Quadro de correspondência de identificação ligante → numeração

Cal aérea	1
Cal hidráulica	2
Cal aérea+cimento	3

A seguir à designação do ligante vem mais um caracter, sendo que este caracter pode ser uma de três letras e diz respeito ao tipo de areia utilizado na argamassa. Assim, as letras com as respectivas correspondências são as seguintes:

Quadro 3.3. – Quadro de correspondência de identificação areia → designação

Areia AGS 1/2	"a" ou "A"
Areia de rio	"r" ou "R"
Areia FPS 120	"f" ou "F"

Depois da designação da areia vem outro dígito que pode variar de 1 a 6, caso se trate de provetes prismáticos, ou de 1 a 3, caso se trate de provetes circulares. Este dígito faz a numeração do provete, permitindo a distinção entre os restantes da mesma argamassa.

No caso de argamassas sem utilização de introdutor de ar a identificação está assim completa. As argamassas com utilização de introdutor de ar possuem mais um caracter a seguir ao dígito correspondente à numeração do provete. O caracter que identifica a utilização de introdutor de ar é o símbolo "+".

Apresenta-se de seguida um quadro de síntese referente à identificação dos vários provetes existentes neste trabalho. O quadro está concebido para o caso de provetes prismáticos, sendo que a única diferença para o caso de provetes circulares é que o número de provetes varia somente entre 1 e 3. O código dos provetes é semelhante para provetes prismáticos e circulares, pois os mesmos são perfeitamente distintos na sua forma, bem como os ensaios a realizar, não havendo possibilidade de equívocos.

Quadro 3.4. – Quadro de síntese de identificação de provetes

Espalhamento (55% ou 75%)	Início (st ou ST)	Ligante (1, 2, 3)	Areia (a ou A, r ou R, f ou F)	Nº do provete (1 → 6)	Aditivo (+)	Código dos provetes
55% (minúscula)	st	C. A. (1)	AGS 1/2 (a)	1, ..., 6	-	st1a1, ..., st1a6
75% (MAIÚSCULA)	ST	C. A. (1)	AGS 1/2 (A)	1, ..., 6	-	ST1A1, ..., ST1A6
55% (minúscula)	st	C. A. (1)	Rio (r)	1, ..., 6	-	st1r1, ..., st1r6
75% (MAIÚSCULA)	ST	C. A. (1)	Rio (R)	1, ..., 6	-	ST1R1, ..., ST1R6
55% (minúscula)	st	C. A. (1)	FPS 120 (f)	1, ..., 6	-	st1f1, ..., st1f6
75% (MAIÚSCULA)	ST	C. A. (1)	FPS 120 (F)	1, ..., 6	-	ST1F1, ..., ST1F6
55% (minúscula)	st	C. H. (2)	AGS 1/2 (a)	1, ..., 6	-	st2a1, ..., st2a6
75% (MAIÚSCULA)	ST	C. H. (2)	AGS 1/2 (A)	1, ..., 6	-	ST2A1, ..., ST2A6
55% (minúscula)	st	C. H. (2)	Rio (r)	1, ..., 6	-	st2r1, ..., st2r6
75% (MAIÚSCULA)	ST	C. H. (2)	Rio (R)	1, ..., 6	-	ST2R1, ..., ST2R6
55% (minúscula)	st	C. H. (2)	FPS 120 (f)	1, ..., 6	-	st2f1, ..., st2f6
75% (MAIÚSCULA)	ST	C. H. (2)	FPS 120 (F)	1, ..., 6	-	ST2F1, ..., ST2F6
55% (minúscula)	st	C. A.+Ci (3)	AGS 1/2 (a)	1, ..., 6	-	st3a1, ..., st3a6
75% (MAIÚSCULA)	ST	C. A.+Ci (3)	AGS 1/2 (A)	1, ..., 6	-	ST3A1, ..., ST3A6
55% (minúscula)	st	C. A.+Ci (3)	Rio (r)	1, ..., 6	-	st3r1, ..., st3r6
75% (MAIÚSCULA)	ST	C. A.+Ci (3)	Rio (R)	1, ..., 6	-	ST3R1, ..., ST3R6
55% (minúscula)	st	C. A.+Ci (3)	FPS 120 (f)	1, ..., 6	-	st3f1, ..., st3f6
75% (MAIÚSCULA)	ST	C. A.+Ci (3)	FPS 120 (F)	1, ..., 6	-	ST3F1, ..., ST3F6
55% (minúscula)	st	C. A. (1)	Rio (r)	1, ..., 6	Int. de ar (+)	st1r1+, ..., st1r6+
75% (MAIÚSCULA)	ST	C. A. (1)	Rio (R)	1, ..., 6	Int. de ar (+)	ST1R1+, ..., ST1R6+
55% (minúscula)	st	C. H. (2)	Rio (r)	1, ..., 6	Int. de ar (+)	st2r1+, ..., st2r6+
75% (MAIÚSCULA)	ST	C. H. (2)	Rio (R)	1, ..., 6	Int. de ar (+)	ST2R1+, ..., ST2R6+
55% (minúscula)	st	C. A.+Ci (3)	Rio (r)	1, ..., 6	Int. de ar (+)	st3r1+, ..., st3r6+
75% (MAIÚSCULA)	ST	C. A.+Ci (3)	Rio (R)	1, ..., 6	Int. de ar (+)	ST3R1+, ..., ST3R6+

C.A. – cal aérea, C.H. – cal hidráulica, Ci – cimento

3.1.3. Ensaio prévios e execução de argamassas

Antes e durante a fase de preparação de argamassas procedeu-se a alguns ensaios, quer dos materiais, quer das argamassas. Uma vez que estes ensaios não se enquadram no âmbito dos ensaios dos provetes endurecidos, achou-se por bem colocar a descrição desses ensaios neste subcapítulo. Os procedimentos de ensaio aqui descritos são relativos às baridades dos materiais e ao ensaio de espalhamento das argamassas.

3.1.3.1. Determinação da baridade dos materiais

A baridade de agregados é definida como a massa por unidade de volume aparente, cujo volume engloba a quantidade de vazios entre as partículas dos agregados e entre os agregados e o recipiente em que está a ser determinada. O ensaio de determinação das baridades das areias e ligantes foi baseado na norma NP EN 1097-3:2002 [30] e na ficha de ensaio do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia, ficha de ensaio Fe 15 [15].

O procedimento utilizado para a determinação das baridades das areias e ligantes é em tudo semelhante, excepto no recipiente utilizado para a sua determinação, que no caso das areias tem um volume bastante superior, facto que está relacionado com a dimensão das partículas, que no caso das areias são mais grossas relativamente às dos ligantes. Portanto, refere-se somente um procedimento, fazendo referência aos diferentes volumes dos recipientes utilizados neste tipo de ensaio.



Figura 3.4. – Recipientes para determinação de baridades: esquerda → areias, direita → ligantes

Antes de se proceder à determinação das baridades dos materiais, foi necessário determinar o volume dos recipientes utilizados no ensaio. Começa-se por referir esse procedimento e de seguida o da determinação da baridade.

Inicialmente determinou-se a massa do recipiente (m_0). Encheu-se de seguida o recipiente com água até este ficar completamente cheio, tampando-o de seguida com uma placa de vidro, de modo a não criar bolhas de ar entre a água do recipiente e a placa. Determinou-se a massa do conjunto (m_1). Depois de vazada a água e limpos o recipiente e a placa de vidro, pesou-se o conjunto dos dois utensílios (m_2). Com estes dados foi possível determinar o volume do recipiente, através da expressão:

$$V = \frac{m_1 - m_2}{\rho} \quad [\text{cm}^3] \quad (3.1)$$

em que,

V – volume do recipiente utilizado no ensaio [cm^3]

ρ – massa volúmica da água [g/cm^3]

O valor da massa volúmica presente na expressão é adoptado em função da temperatura da água. Na ficha de ensaio Fe 15 está presente um quadro que faz a correlação entre a temperatura da água e a sua massa volúmica.

Os recipientes utilizados neste ensaio apresentaram os seguintes volumes:

Quadro 3.5. – Quadro de volumes dos recipientes utilizados nos ensaios de determinação de baridades

Recipientes	Volume [cm^3]
Recipiente para areias	3022
Recipiente para ligantes	488,1

Para a determinação da baridade das areias foi necessário que no início do ensaio cada areia se encontrasse seca e a massa constante, tendo sido colocadas em estufa a 110°C a fim de se obterem as condições referidas. Os ligantes foram colocados dentro de frascos vedados desde a abertura dos sacos nos quais são fornecidos e portanto as suas condições são praticamente as mesmas desde o seu fornecimento. Para a determinação da baridade dos ligantes não se procedeu a secagem, sendo a determinação feita utilizando os ligantes directamente dos frascos.

Com as areias nas condições de iniciar o ensaio, procedeu-se à montagem do sistema de ensaio que consistiu basicamente num esquema de montagem em que o recipiente fica apoiado numa superfície plana, com um funil colocado num suporte e centrado sobre a abertura do recipiente. Desta forma garante-se que a distância que separa a parte inferior do funil da parte superior do recipiente permanece constante. Esta distância é de 50mm. No caso dos ligantes não é montado o suporte, sendo o funil segurado manualmente e a distância entre o funil e o recipiente controlada de forma aproximada, o mais constante possível.

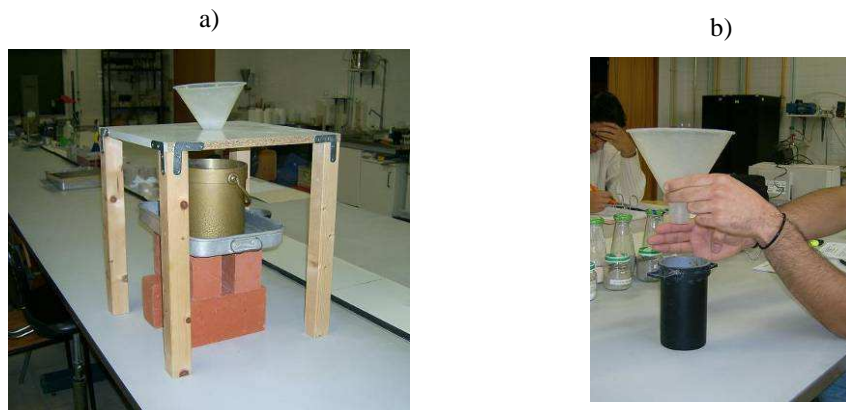


Figura 3.5. – a) Sistema de ensaio de baridade de areias; b) Sistema de ensaio de baridade de ligantes

Com os utensílios em posição, verteu-se a areia/ligante para dentro do funil, com o auxílio de uma colher de pedreiro, de forma que o material descesse pelo funil de forma gradual e a velocidade aproximadamente constante. Esta operação repetiu-se até que o recipiente se encontrasse completamente cheio e se tivesse formado um cone de material e o recipiente não admitisse mais material. No processo de enchimento do recipiente não se procedeu a nenhuma compactação para além daquela que é exercida pela gravidade aquando da queda do material para o interior do recipiente.

De seguida, rasou-se o material em excesso no recipiente com o auxílio de uma régua metálica plana. Este processo é feito de forma lenta, movimentando a régua metálica em forma de serra, de maneira a que a superfície do material fique ao mesmo nível dos bordos do recipiente e a sua superfície plana e homogênea.

No final desta operação determinou-se a massa do conjunto recipiente+material (m_3). O valor da baridade do material (Ba) é obtido pela expressão:

$$Ba = \frac{m_3 - m_0}{V} \quad [\text{g/cm}^3] \quad (3.2)$$

3.1.3.2. Execução de argamassas

O procedimento de execução das argamassas é praticamente igual entre todas as amassaduras, com excepção de algumas situações em particular, como por exemplo a mistura de introdutor de ar nas argamassas correspondentes. Assim, o procedimento

adoptado foi baseado nas fichas de ensaio do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia referentes à execução de argamassas, ficha de ensaio Fe 19 [14], e também na norma europeia correspondente, EN 1015-2:1998 [24].

Para se conseguir determinar, de forma aproximada, as quantidades de água a utilizar nas amassaduras, são efectuadas amassaduras de teste previamente, para se aferir a quantidade de água a utilizar na amassadura definitiva. Estas amassaduras de teste correspondem a um volume de material sólido de 800cm^3 , enquanto a amassadura definitiva corresponde a um volume de material sólido de 2600cm^3 .

Cada amassadura definitiva diferente dá origem a 9 provetes, sendo que 3 deles são circulares e os restantes 6 são prismáticos.

A execução das amassaduras das argamassas de teste e das argamassas finais segue um procedimento em tudo semelhante, excepto na mistura da água com o material sólido, em que nas amassaduras de teste a água é adicionada posteriormente ao material sólido estar dentro da cuba e com a misturadora em funcionamento para que se possa acertar a quantidade de água para o espalhamento pretendido, sendo adicionada água quando necessária, ou seja, quando o valor do ensaio de espalhamento fica abaixo do pretendido. Com base na água utilizada nas amassaduras de teste, extrapola-se o valor para a água a utilizar nas amassaduras definitivas, sendo nesse caso a água colocada na cuba antes dos materiais sólidos. Portanto, o procedimento que se passa a explicar é aquele aplicado quer às argamassas de teste, quer às argamassas definitivas, exceptuando no ponto referido atrás.

Procedimento

Inicialmente as areias a utilizar foram retiradas da estufa, que se encontrava a 110°C , onde repousaram durante alguns dias em tabuleiros, garantindo assim que o material se encontrava seco aquando da utilização. Foram deixadas a arrefecer durante algum tempo, até se encontrarem a uma temperatura mais baixa, para um manuseamento mais fácil.

Os vários ligantes estavam armazenados em frascos plásticos vedados, numa sala climatizada de condições ambiente de $20\pm 2^\circ\text{C}$ de temperatura e $65\pm 5\%$ de humidade

relativa. Enquanto a areia arrefecia, o ligante foi trazido para a local de trabalho e foi acondicionada num tabuleiro a quantidade de ligante necessária a utilizar, determinada previamente. Depois do ligante foi a vez de colocar no mesmo tabuleiro a quantidade de areia necessária e também previamente determinada. A massa destes componentes foi medida numa balança do laboratório com precisão de 0,1g, após se terem convertido os traços volumétricos em ponderais, utilizando as baridades previamente determinadas.

Uma vez colocados o ligante e a areia no tabuleiro, procedeu-se ao envolvimento dos dois componentes com recurso a uma pequena pá até se obter uma mistura homogénea.

Quando a mistura do ligante com a areia se encontrava pronta, verteu-se a água de amassadura para dentro da cuba da misturadora utilizada para realizar a amassadura. A quantidade de água foi aquela, previamente determinada, necessária à obtenção do valor desejado de espalhamento no ensaio a realizar mais à frente. Verteu-se de seguida a mistura sólida do tabuleiro para a cuba, ficando todos os componentes da argamassa em contacto.

Com todos os componentes da argamassa no interior da cuba, montou-se esta na misturadora e ajustou-se o conjunto para a pá da misturadora efectuar uma mistura homogénea. Procedeu-se à mistura mecânica dos componentes. Inicialmente a mistura foi efectuada durante um período de 45s, havendo de seguida uma paragem de 30s no processo para se proceder à limpeza de material não envolvido presente na pá da misturadora, bem como das paredes laterais da cuba. Voltou-se a colocar o conjunto de novo em condições de operar e procedeu-se a nova mistura, agora durante 90s.

Acabado o processo de mistura dos componentes, retirou-se a cuba da misturadora e transportou-se para o dispositivo de ensaio de espalhamento, onde foi realizado esse teste para aferir o valor de espalhamento da argamassa. Este ensaio está descrito posteriormente no ponto 3.1.3.3..

Depois de confirmado o valor de espalhamento da argamassa procedeu-se à moldagem dos provetes. Neste trabalho foram utilizados dois tipos de moldes metálicos:

- Circular (diâmetro = 95mm, espessura = 10mm)
- Prismático (160x40x40mm³)

Os moldes circulares foram utilizados para a obtenção de provetes de argamassa para a realização de ensaios de permeabilidade ao vapor de água. Os moldes prismáticos foram utilizados para a realização dos restantes ensaios.

O preenchimento dos moldes circulares foi feito de uma só vez e com recurso a uma pequena colher de pedreiro para acondicionar e pressionar a argamassa, para que preenchesse a totalidade do molde. O preenchimento dos moldes prismáticos foi feito em duas etapas. Numa primeira fase encheu-se os moldes até cerca de metade, acondicionou-se a argamassa no molde com uma espátula para um correcto preenchimento e procedeu-se a uma compactação por meio de um dispositivo compactador. A compactação é feita por meio de 20 pancadas efectuadas por uma plataforma móvel do dispositivo a que está preso o molde com a argamassa. De seguida encheu-se o restante espaço do molde, voltou-se a acondicionar a argamassa e voltou-se a compactar, novamente com 20 pancadas.

Por último, tanto os moldes circulares como os prismáticos, foram rasados na superfície para retirar o excesso de argamassa e ficarem com a superfície superior perfeitamente plana. Uma vez prontos os provetes frescos nos moldes, estes foram levados para cura.



Figura 3.6. – Argamassa fresca em molde prismático

3.1.3.3. Ensaio de consistência por espalhamento de argamassas

Os ensaios de espalhamento realizados neste trabalho têm como base as indicações dos ensaios descritos na ficha de ensaio de determinação da consistência, Fe 25 [12], do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia e também na

norma EN 1015-3:1999 [25]. Todas as argamassas realizadas durante o desenvolvimento experimental foram sujeitas a ensaios de espalhamento. Para cada argamassa de constituição semelhante foram realizadas duas amassaduras distintas como já foi referido, em que uma foi realizada com uma quantidade de água necessária para obter um valor no ensaio de espalhamento de 55% e outra com uma quantidade de água necessária para obter um valor no ensaio de espalhamento de 75%.

Após se ter envolvido todos os constituintes da argamassa na cuba, com a misturadora mecânica, a argamassa foi levada para junto da mesa de ensaio de espalhamento. Com recurso a um pano húmido limpou-se a superfície da mesa de ensaio de consistência, bem como o molde tronco-cónico.

Colocou-se o molde tronco-cónico no centro da mesa de consistência. De seguida homogeneizou-se manualmente a argamassa no interior da cuba com recurso a uma pequena colher de pedreiro e com essa mesma colher retirou-se argamassa da cuba e preencheu-se o molde tronco-cónico até cerca de metade. Com recurso a um varão metálico acondicionou-se e compactou-se a argamassa no interior do molde, para esta preencher todo o espaço do molde, preenchendo de seguida o restante espaço do molde e repetindo a operação com o varão. Depois de preenchido, rasou-se a superfície do molde com a colher de pedreiro para retirar o excesso de argamassa.



Figura 3.7. – a) Mesa de ensaio de espalhamento, molde tronco-cónico e varão metálico; b) Craveira e régua para medição de espalhamentos

De seguida, retirou-se lentamente o molde na vertical, tendo o cuidado de deixar a argamassa intacta na mesa. Limpou-se o excesso de água que eventualmente estivesse em redor da argamassa. Rodou-se a manivela da mesa de consistência para que se

produzissem pancadas com a mesa de espalhamento, que resultam no espalhamento da argamassa. O número de pancadas efectuadas foi de 15, sendo dadas a um ritmo constante, de aproximadamente uma pancada por segundo.

Com a argamassa espalhada sobre a mesa, efectuaram-se as medições dos diâmetros, (d), da argamassa espalhada. Estas medições foram efectuadas com recurso a uma craveira, em 4 direcções que se encontram marcadas na mesa. Cada um destes diâmetros representa o valor de espalhamento da argamassa na respectiva direcção, obtido pela expressão:

$$Espalhamento = \frac{d-10}{10} \times 100 \quad [\%] \quad (3.3)$$

O valor de espalhamento da argamassa é obtido pela média dos 4 valores, correspondentes às 4 direcções.

3.1.4. Cura

O processo de cura de todos os provetes é bastante semelhante, variando somente no tempo de cura entre algumas argamassas.

Quando a moldagem dos provetes foi concluída, estes foram levados para uma sala climatizada, com temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e humidade relativa de $65 \pm 5\%$. Os provetes permaneceram nos moldes durante um período de 7 dias. Após esse período, os provetes foram desmoldados e continuaram em repouso na sala prosseguindo a sua cura. Durante a cura os provetes foram colocados sobre dois suportes de plástico, apoiando-se em uma das faces maiores. O período de cura das várias argamassas é apresentado no quadro abaixo.

Quadro 3.6. – Quadro de períodos de cura das diferentes argamassas

Argamassas			Cura (dias)
Ligante	Agregado	Adjuvante	
C.A.	AGS 1/2	-	91
	Rio	-	91
	FPS 120	-	90
C.H.	AGS 1/2	-	62
	Rio	-	61
	FPS 120	-	61
C.A.+Ci	AGS 1/2	-	61
	Rio	-	62
	FPS 120	-	61
C.A.	Rio	Int. de ar	61
C.H.		Int. de ar	61
C.A.+Ci		Int. de ar	61

As argamassas de constituição semelhante, com diferentes quantidades de água, tiveram tempos de cura iguais; por essa razão o quadro contém somente a constituição das argamassas. O tempo de cura das argamassas de cal aérea foi superior ao das restantes (excepto nas argamassas com utilização de adjuvante), pois a carbonatação, que é o fenómeno responsável pelo endurecimento e desenvolvimento de resistências mecânicas destas argamassas, é um processo lento e por essa razão a cura foi mais longa, com o objectivo de obter um maior nível de carbonatação aquando da realização dos ensaios aos provetes.



Figura 3.8. – Provetes acondicionados em cura

No final do tempo de cura, os provetes foram transferidos para estufa com temperatura a 60°C. Os provetes permaneceram na estufa para secar e atingir massa constante e mantiveram-se aí até a altura de realização de ensaios.

3.2. Procedimentos experimentais de ensaio a provetes

3.2.1. Considerações prévias sobre os ensaios

Os provetes de todas as argamassas realizadas neste trabalho foram sujeitos aos mesmos ensaios, com o objectivo de comparar posteriormente todos os resultados obtidos em cada um deles e efectuar uma avaliação das argamassas.

Como já foi referido, cada argamassa realizada deu origem a 6 provetes de forma prismática e 3 provetes de forma circular. Foi também já referido que cada um destes provetes foi identificado e numerado, de 1 a 6 no caso dos provetes prismáticos e de 1 a 3 no caso dos provetes circulares. Para melhor entendimento e acompanhamento dos ensaios efectuados, explica-se de seguida o plano de ensaios seguido para os provetes de cada argamassa.

Provetes prismáticos

Os provetes prismáticos de cada argamassa dividiram-se em 2 grupos com o mesmo número de provetes. Para cada um destes grupos estabeleceu-se um plano de ensaios diferente, pois era impossível realizar todos os ensaios previstos neste trabalho para um só grupo de provetes prismáticos. O primeiro grupo de provetes foi composto pelos provetes numerados de 1 a 3 e o segundo pelos provetes numerados de 4 a 6.

Os provetes prismáticos numerados de 1 a 3 foram inicialmente sujeitos ao ensaio de absorção de água por capilaridade.

Depois de terminado o ensaio de absorção de água por capilaridade estes provetes foram imersos em água, com o objectivo de absorverem a máxima quantidade de água, até se encontrarem a massa constante. Quando os provetes se encontravam saturados deu-se início ao ensaio de secagem. Com este ensaio terminou o plano a realizar a estes provetes.

Os provetes numerados de 4 a 6 começaram por ser usados no ensaio de determinação do módulo de elasticidade dinâmico.

Após o ensaio de determinação do módulo de elasticidade dinâmico estes provetes foram ensaiados à flexão. Após este ensaio os provetes ficaram divididos em duas partes, mais precisamente duas metades.

Uma das metades resultantes do ensaio de resistência à flexão foi utilizada para um ensaio que não faz parte do âmbito deste trabalho de investigação (ensaio de durabilidade: ciclos de gelo/degelo). A outra metade foi utilizada no ensaio de resistência à compressão. Mais uma vez, após este ensaio, resultaram dois pequenos bocados, correspondentes a cada um dos topos da metade ensaiada. A parte central da metade ensaiada ficou desfeita após o ensaio de resistência à compressão.

Um dos topos resultantes do ensaio de resistência à compressão de cada um dos provetes foi utilizado no ensaio de determinação da porosidade aberta das argamassas, bem como para a determinação da massa volúmica. Com este ensaio terminou a utilização deste grupo de provetes.

Provetes circulares

Estes provetes foram utilizados somente na realização de um ensaio, a determinação da permeabilidade ao vapor de água das argamassas.

3.2.2. Ensaio de absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade realizado seguiu as indicações presentes na ficha de ensaio do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia, ficha de ensaio Fe 06 [16]. O ensaio decorreu na sala climatizada, com ambiente de temperatura $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ e humidade relativa de $65\pm 5\%$.

Inicialmente preparou-se o equipamento em que decorreu o ensaio. Dentro de uma caixa plástica com tampa colocou-se água em quantidade suficiente para criar condições de saturação. No interior da caixa colocaram-se apoios para suportar o tabuleiro no qual se

iriam colocar os provetes. Os apoios ficaram assentes no fundo da caixa e portanto dentro da água que se colocou previamente. No entanto, os apoios têm altura suficiente para que a sua parte superior ficasse fora de água e impossibilitasse que esta estivesse em contacto com o tabuleiro que os apoios suportariam. Por cima dos apoios foi colocado um tabuleiro, cuja superfície interior foi forrada com papel absorvente, de tal modo que a superfície do fundo fosse homogénea e plana. Molhou-se o papel absorvente até estar criada uma lâmina de água com altura de aproximadamente 2mm. Tentou-se manter esta altura de água durante o decorrer do ensaio dentro do possível, adicionando água à medida que esta ia sendo absorvida pelos provetes. Durante a noite, altura em que não se encontrava ninguém no laboratório, a água absorvida pelos provetes não era possível de ser reposta no tabuleiro. Por essa razão, no final do dia, e depois da grande absorção inicial dos provetes se ter desenrolado, adicionou-se uma maior quantidade de água ao tabuleiro, para que a absorção continuasse a decorrer de forma semelhante durante a noite.

Antes de se proceder ao início do ensaio, os provetes foram retirados da estufa, a temperatura de $60\pm 5^{\circ}\text{C}$, para onde foram levados no final da cura e onde se encontraram a secar até atingirem massa constante (diferença de massa dos provetes entre pesagens sucessivas inferior a 0,1%). Depois de retirados da estufa, os provetes ficaram a arrefecer até se encontrarem à temperatura ambiente.

Determinou-se a massa de cada provete seco, com uma balança de precisão 0,001g. Após pesagem, cada provete foi colocado no tabuleiro apoiado em uma das faces menores, ficando na vertical. O mesmo procedimento foi efectuado para todos os provetes a ensaiar. Quando os provetes se encontravam todos dentro da caixa, esta foi fechada com a tampa, para que a evaporação de água fosse mínima. No instante em que se colocou o primeiro provete no tabuleiro activou-se o cronómetro para se efectuar um controlo do tempo das medições de massa a realizar aos provetes. Assim, foram efectuadas medições de massa aos 5, 10, 15, 30, 60 e 180 minutos e posteriormente de 24 horas em 24 horas.

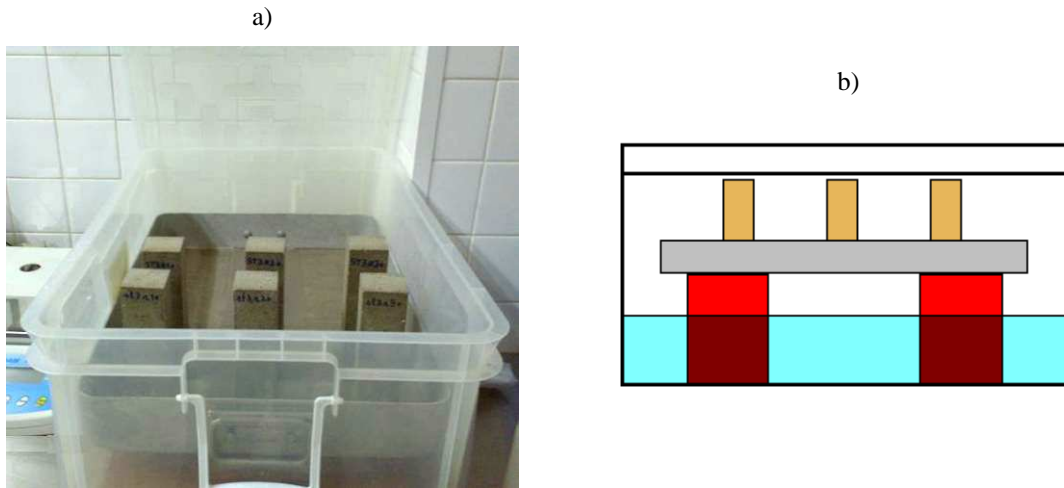


Figura 3.9. – a) Ensaio de absorção de água por capilaridade; b) Esquema de disposição dos equipamentos e materiais do ensaio de absorção de água por capilaridade

Com as medições efectuadas calculou-se o valor da quantidade de água absorvida, através da expressão:

$$m_i = \frac{m_2 - m_1}{S} \quad [\text{kg/m}^2] \quad (3.4)$$

em que:

m_i – quantidade de água absorvida

m_1 – massa do provete seco, em kg

m_2 – massa do provete no intervalo de tempo referido, em kg

S – área da face do provete em contacto com a água, em m^2

Com os valores obtidos foi traçado, para cada argamassa, um gráfico com abcissas relativas a valores de tempo, expressas em \sqrt{t} (em segundos), e em ordenadas as quantidades de água absorvida, expressas em kg/m^2 , obtendo-se normalmente curvas cujo troço inicial é um segmento de recta que passa pela origem. O coeficiente angular deste segmento de recta corresponde ao coeficiente de absorção de água por capilaridade, sendo expresso em $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}^{0.5}$. O coeficiente de absorção de água por capilaridade foi obtido considerando os primeiros 60 minutos de ensaio. Para além disso, determinou-se também o valor assintótico da curva de absorção, que é considerado atingido quando a diferença entre dois valores sucessivos de quantidades de água absorvida, m_i e m_{i-1} for inferior a 1%, correspondendo então ao valor m_i .

3.2.3. Ensaio de secagem

O ensaio de secagem realizado teve por base indicações presentes na ficha de ensaio do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia, ficha de ensaio Fe 07 [20], bem como outros documentos e trabalhos de investigação relativos a este tema, como um documento sobre absorção e secagem de água da Professora A. E. Charola [6] e uma tese de Ana Paula Pinto sobre conservação de pedra [42].

No presente trabalho, o ensaio de secagem decorreu após a conclusão do ensaio de absorção de água por capilaridade. Antes de iniciar o ensaio de secagem, os provetes foram imersos em água para absorver a maior quantidade de água para o seu interior, até se encontrarem a massa constante. Nesta fase foi determinada a massa dos provetes diariamente para aferir quando é que os provetes se encontravam nas condições de começar o ensaio de secagem.

O ensaio de secagem desenrolou-se na sala climatizada onde decorreu também o ensaio anterior, mantendo-se as condições da sala, ou seja, temperatura de $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ e humidade relativa de $65\pm 5\%$. Antes de se iniciar o ensaio procedeu-se à preparação do sistema de ensaio. Foi preparado um recipiente, em cujo fundo foi colocada uma rede de borracha para suportar os provetes. Esta rede tem a finalidade de promover a evaporação também pela face inferior dos provetes, não ficando estes apoiados no fundo da caixa e na totalidade da face. Uma vez que na sala climatizada se registava alguma movimentação do ar devido ao funcionamento do dispositivo de climatização, procedeu-se à montagem de uma protecção em cartão com a finalidade de proteger os provetes dessa movimentação de ar. No entanto, a protecção não isolou os provetes do restante ambiente da sala, havendo várias aberturas na protecção de cartão, nomeadamente uma de grandes dimensões no lado oposto à câmara climática. A protecção de cartão tinha também uma abertura que permitia o acesso aos provetes aquando da realização das medições de massa.



Figura 3.10. – Ensaio de secagem. Sistema de ensaio no interior da protecção de cartão

Com o sistema de ensaio devidamente preparado, deu-se então início ao ensaio. Num suporte plano colocaram-se os provetes saídos de imersão, envolvidos por uma toalha bastante molhada. Esta toalha tinha a finalidade de impedir a secagem dos provetes saturados. Cada um dos provetes foi então pesado numa balança com precisão de 0,001g e colocado dentro da caixa do ensaio de secagem. Esta operação foi repetida para cada um dos provetes ensaiados. Quando foi colocado o primeiro provete dentro da caixa activou-se o cronómetro, para temporizar os intervalos de tempo de medição de massa dos provetes necessários efectuar. Assim, foram efectuadas medições de massa dos provetes aos 5, 10, 20, 30, 60, 120, 180 e 300 minutos, tendo as medições seguintes sido efectuadas diariamente com pelo menos duas medições sempre que possível, terminando o ensaio quando se atingiu o valor assintótico de secagem.

Com os dados obtidos através das medições de massa dos provetes procedeu-se à elaboração de curvas de evaporação, ou curvas de secagem, expressando a evolução do teor de água dos provetes, em %, ao longo do tempo, em horas.

Determinou-se também o índice de secagem, (IS), de cada provete através da expressão:

$$IS = \frac{\sum_{i=1}^{i=ns} \left[(t_i - t_{i-1}) \times \frac{Q_{i-1} - Q_i}{2} \right]}{Q_{\max} \times t_f} \quad (3.5)$$

em que:

Q_i – quantidade de água no interior do provete no instante “i”, expressa em percentagem relativamente à massa seca

Q_{\max} – quantidade de água inicial, expressa em percentagem relativamente à massa seca

t_f – tempo final de ensaio, em horas

t_i – tempo de ensaio “i”, em horas

ns – número de pesagens de controlo efectuadas

3.2.4. Ensaio de determinação do módulo de elasticidade dinâmico

O ensaio de determinação do módulo de elasticidade dinâmico seguiu as indicações presentes na ficha de ensaio do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia, ficha de ensaio Fe 08 [21]. Neste método, o módulo de elasticidade é determinado através da medição da frequência de ressonância longitudinal dos provetes.

Antes de proceder ao ensaio foi necessário preparar todo o sistema de ensaio. Este ensaio foi realizado com recurso a dois equipamentos: um computador com software preparado para este ensaio, que regista os resultados, e um aparelho emissor e receptor de vibrações que se encontra ligado ao computador. Os provetes utilizados neste ensaio foram postos em estufa a temperatura de $60 \pm 5^\circ\text{C}$ para secagem, até ter sido atingida massa constante. Depois de estarem a massa constante, os provetes foram retirados da estufa, tendo sido determinada a sua massa numa balança com precisão de 0,001g.

Cada um dos provetes ensaiados foi inserido no aparelho emissor de vibrações, tal como mostra a figura abaixo, e a sua massa seca inserida no software informático. Uma das extremidades do provete fica encostada à fonte emissora de vibração, enquanto a outra fica colocada a cerca de 1mm da fonte de recepção. Através do software deu-se início à determinação, em que o aparelho emite vibrações cujas frequências e amplitudes são registadas pelo computador.

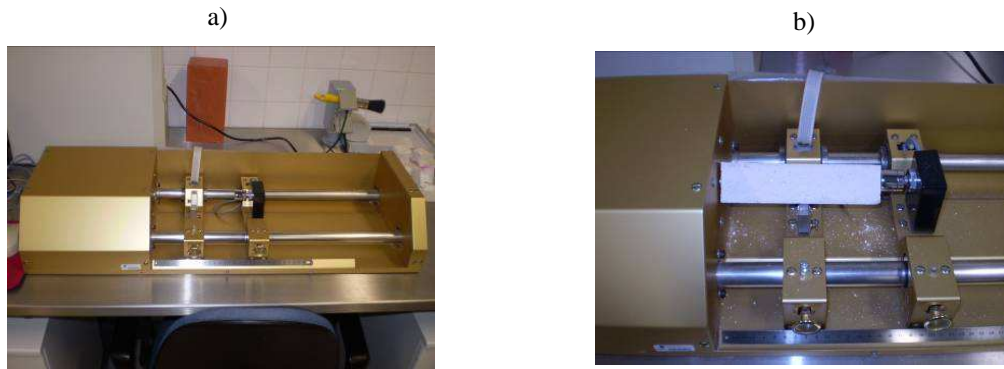


Figura 3.11. – a) Equipamento de medição; b) Medição do módulo de elasticidade

Através do registo, o software obtém a frequência de ressonância longitudinal, que corresponde à frequência mais baixa para a qual se obtém uma amplitude máxima. Automaticamente, o software fornece os dados da frequência de ressonância e o módulo de elasticidade dinâmico do provete em ensaio. O módulo de elasticidade dinâmico que o software determina é obtido através da expressão:

$$E = (2lf_0)^2 \times \frac{\rho}{g} \times 10^{-6} \quad [\text{MPa}] \quad (3.5)$$

em que:

l – comprimento do provete [m]

f_0 – frequência de ressonância longitudinal [Hz]

ρ – peso volúmico do material [N/m^3]

g – aceleração da gravidade [m/s^2]

Este procedimento foi repetido mais uma vez para cada provete, alterando a posição do provete, trocando as faces do provete correspondentes à emissão e recepção das vibrações, tal como ilustrado na figura 3.12.. O valor do módulo de elasticidade dinâmico é o resultado da média entre os dois valores determinados.

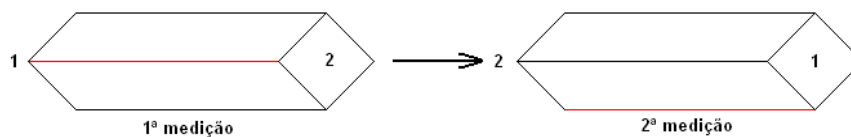


Figura 3.12. – Esquema de posições adoptadas para as medições do módulo de elasticidade dinâmico

3.2.5. Ensaio de resistência à flexão

O ensaio de resistência à flexão seguiu as indicações presentes na ficha de ensaio do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia, ficha de ensaio Fe 27 [13].

Antes de proceder ao ensaio de resistência à flexão os provetes permaneceram em estufa a temperatura de $60\pm 5^{\circ}\text{C}$ para secagem, até atingirem massa constante. Preparou-se também o sistema de ensaio, que basicamente consiste numa máquina universal de tracção ligada a um computador com o respectivo software de ensaio. A máquina universal de tracção foi equipada com uma célula de carga de 50KN, uma peça metálica que incide a meio vão do provete, fazendo-o flectir e um suporte de apoio para os provetes, que consiste numa peça metálica específica com dois apoios distanciados de 100mm. No software de ensaio, foi escolhida a aplicação destinada a este tipo de ensaio, que consiste numa aplicação de carga a uma velocidade de 5,1mm/min. Procedeu-se então à definição das várias posições adoptadas pela máquina durante o ensaio e à preparação para o início dos ensaios.



Figura 3.13. – Peças metálicas específicas de ensaio à tracção: suporte de provetes (esquerda), peça de carregamento (direita)

Antes de carregar o provete é necessário ter em atenção que o provete está devidamente centrado na peça de apoio. É necessário verificar também que as faces apoiada e carregada são as faces mais planas do prisma, ou seja, aquelas que estavam em contacto com as paredes do molde quando a argamassa foi moldada. No software deu-se início ao ensaio e quando a peça de carregamento entrou em contacto com o provete foi aplicada em primeiro lugar uma pré-carga de 10N ao provete, sendo depois a restante carga aplicada. A pré-carga aplicada serve para a estrutura do provete responder ao carregamento que lhe está a ser aplicado, havendo um reajustamento das partículas no

seu interior. No final do carregamento o provete foi separado na zona por onde cedeu, ficando assim dividido em duas partes.



Figura 3.14. – Ensaio de resistência à flexão

No final de cada ensaio o software registou a força de flexão, (F_f), exercida pela máquina e que levou o provete à rotura. Esse valor permitiu então a determinação da resistência à flexão do provete, obtida pela expressão:

$$R_f = \frac{1,5 \times F_f \times l}{b^3} \quad [\text{MPa}] \quad (3.6)$$

em que:

l – distância entre os apoios do suporte do provete [mm]

b – medida do lado da secção quadrada do provete [mm]

3.2.6. Ensaio de resistência à compressão

Este ensaio seguiu as indicações presentes na ficha de ensaio do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia, ficha de ensaio Fe 27 [13].

A preparação do ensaio de resistência à compressão foi semelhante à do ensaio de resistência à flexão, excepto nos pontos que se passa a explicar. O suporte dos provetes foi diferente daquele usado no ensaio anterior, sendo que neste caso foi usado um suporte próprio do ensaio de compressão, com superfície plana e de forma quadrangular. Os provetes utilizados na realização deste ensaio são uma das metades

resultantes dos provetes que foram ensaiados à flexão. O provete foi colocado dentro de uma cápsula especial, perfeitamente centrado, à qual foi acoplada uma peça por cima, através da qual foi transmitido o esforço imposto pela máquina. A peça de carregamento é também diferente, sendo plana e de forma quadrangular, perfazendo o conjunto uma área de contacto de 1600mm^2 . O funcionamento do software é semelhante ao do ensaio de resistência à flexão, excepto na aplicação escolhida, que desta vez foi aquela destinada a ensaios de compressão, cuja velocidade de carga é de $5,25\text{mm/min}$, até à rotura do provete. A pré-carga deste ensaio é de 20N . Mais uma vez, as faces do provete em contacto com o suporte e a peça de carregamento foram aquelas mais planas, ou seja, as que contactavam com as faces laterais do molde onde as argamassas foram moldadas.

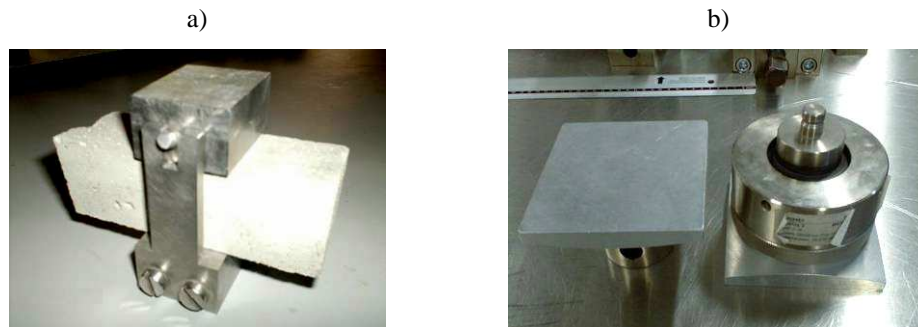


Figura 3.15. – a) Cápsula de ensaio de compressão; b) Peças metálicas de suporte de cápsula e de carregamento



3.16. – Ensaio de resistência à compressão

Após o carregamento dos provetes, a parte central ficou desfeita, sobrando os topos da metade do provete utilizado. Após o carregamento dos provetes, o software registou a força de compressão correspondente à rotura, (F_c), exercida pela máquina sobre o

provete. Através do valor dessa força calculou-se a resistência à compressão dos provetes, através da expressão:

$$R_c = \frac{F_c}{A} \quad [\text{MPa}] \quad (3.7)$$

em que:

A – área de contacto (1600mm^2) [mm^2]

O topo que contém a face plana, que sobrou deste ensaio, foi guardado para a realização do ensaio de porosidade aberta.



Figura 3.17. – Pedacos resultantes de ensaios de compressão para utilização na determinação de porosidade e massa volúmica aparente

3.2.7. Ensaio de determinação da porosidade aberta e determinação da massa volúmica aparente

O ensaio de porosidade aberta realizado seguiu as indicações presentes na ficha de ensaio do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia, ficha de ensaio Fe 02 [18], e a determinação da massa volúmica aparente seguiu as indicações presentes na ficha de ensaio da faculdade, ficha de ensaio Fe 01 [19]. O procedimento de ensaio para estas duas determinações é o mesmo, variando somente o tratamento dos dados obtidos.

Antes de iniciar o ensaio, os provetes de argamassa que resultaram do ensaio de resistência à compressão foram condicionados numa estufa à temperatura de $60\pm 5^\circ\text{C}$ para secagem, até atingirem massa constante.

Antes de colocar os provetes no interior do exsiccador, as suas massas secas foram determinadas numa balança com precisão de 0,001g. De seguida colocaram-se os

provetes no interior do exsicador totalmente seco e limpo e tapou-se com a parte superior. Foi aberta, na totalidade, a válvula que liga o exsicador ao recipiente com sílica gel e foi fechada a válvula que liga o exsicador ao exterior. Com a tampa do exsicador bem fechada ligou-se a bomba de vácuo, fazendo a pressão diminuir gradualmente no seu interior até um valor de 6500Pa. O exsicador permaneceu nestas condições durante um período de 24 horas. Após esse tempo encheu-se lentamente o interior do exsicador com água, por intermédio da válvula que liga ao exterior, parando de encher quando os provetes ficaram totalmente imersos e tendo o cuidado de não deixar a água atingir o nível da válvula que liga ao recipiente contendo a sílica. Após encher o exsicador com água fechou-se novamente a válvula que faz ligação com exterior e o exsicador permaneceu nessas condições durante 24 horas. Passado esse tempo desligou-se a bomba de vácuo e restaurou-se a pressão atmosférica no interior do exsicador, ficando os provetes imersos a essa pressão durante as 24 horas seguintes. Ao final desse tempo procedeu-se à pesagem imersa dos provetes e de seguida, após limpeza da água superficial das amostras com um pano húmido, procedeu-se à pesagem dos provetes saturados.



Figura 3.18. – Ensaio de determinação da porosidade e massa volúmica aparente

Com os dados obtidos nas pesagens efectuadas, procedeu-se à determinação da porosidade aberta dos provetes, (P_{ab}), bem como à determinação da massa volúmica aparente, (M_{vol}), através das expressões:

$$P_{ab} = \frac{m_3 - m_1}{m_3 - m_2} \times 100 \quad [\%] \quad (3.8)$$

$$M_{vol} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times 10^{-3} \quad [\text{kg/m}^3] \quad (3.9)$$

em que:

m_1 – massa do provete seco [g]

m_2 – massa do provete imerso [g]

m_3 – massa do provete saturado [g]

3.2.8. Ensaio de permeabilidade ao vapor de água

O ensaio de permeabilidade ao vapor de água realizado neste trabalho seguiu as indicações presentes na ficha de ensaio do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia, ficha de ensaio Fe 05 [17]. O método de ensaio utilizado foi o método da cápsula húmida.

Antes de se proceder ao ensaio propriamente dito foi necessário realizar um conjunto de trabalhos de preparação preliminares. Assim, começou-se por condicionar os provetes numa estufa a temperatura de $60 \pm 5^\circ\text{C}$ para secagem dos provetes, até estes se encontrarem a massa constante. Depois de atingida a massa constante, os provetes foram retirados da estufa e deixados arrefecer até se encontrarem à temperatura ambiente para a realização do ensaio, altura em que se determinou a sua massa seca. Para a realização deste ensaio foi necessário condicionar os provetes em cápsulas metálicas próprias, devidamente identificadas com o código dos provetes, procedendo a uma preparação particular.

Assim, no fundo do interior das cápsulas colocou-se 1cm de altura de água e embebeu-se um bocado de algodão para evitar salpicos de água para o provete. Colocou-se então o provete circular na parte superior da cápsula, que é mais larga que o fundo, feita especialmente para encaixar o provete. Marcou-se, com o auxílio de um anel metálico e um lápis, o diâmetro da cápsula abaixo da zona onde o provete está apoiado. De seguida selou-se o espaço lateral entre o provete e a cápsula, aplicando silicone até ao limite marcado anteriormente, tornando desta forma toda esta zona impermeável, passando a

área de ensaio do provete a ser até ao silicone, constituindo uma área de $0,00442\text{m}^2$, inferior ao real diâmetro do provete circular.



Figura 3.19. – a) Provete cilíndricos preparados em cápsulas para ensaio de permeabilidade; b) Câmara climática de ensaio de permeabilidade

Com a preparação das cápsulas concluída, pesou-se cada um dos conjuntos. De seguida, colocaram-se os conjuntos numa câmara climática regulada para condições de temperatura de 20°C e humidade relativa de 40%. Realizaram-se pesagens de cada conjunto diariamente para se determinar a quantidade de vapor de água que se difundiu através dos provetes, registando simultaneamente o tempo. As pesagens diárias prosseguiram até que se estabelecesse um regime estacionário de difusão de vapor, em que as diferenças de massa fossem inferiores a 5%:

$$\frac{\frac{\Delta m_i}{t_i} - \frac{\Delta m_{i-1}}{t_{i-1}}}{\frac{\Delta m_i}{t_i}} \times 100 \leq 5\% \quad (3.10)$$

em que:

Δm_i – diferença das massas determinadas nos limites do intervalo de tempo t_i

Δm_{i-1} – diferença das massas determinada nos limites do intervalo de tempo t_{i-1}

Terminado o ensaio, o fluxo de vapor G por unidade de tempo, de cada argamassa, foi obtido a partir da média das diferenças de massa por unidade de tempo (em g/h), através dos três valores obtidos pelos 3 provetes em regime estacionário. A permeabilidade ao vapor de água pôde assim ser determinada, através da expressão:

$$\pi = \frac{G \cdot e}{S \cdot \Delta P \cdot 36 \times 10^5} \quad [\text{kg/m.s.Pa}] \quad (3.11)$$

em que:

e – espessura do provete [m]

S – área de ensaio do provete [m^2]

ΔP – diferencial de pressão do vapor de água entre os dois lados do provete [Pa]

Para a obtenção do valor de ΔP , utilizou-se a expressão:

$$\Delta P = P_e - P_i = P_s \times \frac{Hr_e}{100} - P_s \times \frac{Hr_i}{100} \quad [\text{Pa}] \quad (3.12)$$

em que:

P_e – pressão de vapor existente no ambiente da câmara climática [Pa]

P_i – pressão de vapor existente no interior da cápsula [Pa]

P_s – pressão de vapor de saturação para o valor de temperatura verificado no interior da câmara climática (valor tabelado) [Pa]

Hr_e – humidade relativa no interior da câmara climática [40%]

Hr_i – humidade relativa no interior da cápsula [100%]

4. Apresentação e análise prévia de resultados

Neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos pelas várias argamassas nos diversos ensaios que constituem o plano de ensaios. Os resultados dos ensaios são exibidos sob a forma de gráficos e/ou tabelas.

Para além da apresentação, realizam-se também análises prévias dos resultados obtidos. Estas análises avaliam os resultados de forma simples e directa, estabelecendo tendências e conclusões acerca das diferentes formulações das argamassas. Nas análises prévias é possível avaliar, essencialmente, os seguintes parâmetros: influências dos diferentes tipos de areia, influência dos diferentes tipos de ligante, influência da utilização de diferentes quantidades de água e influência da utilização do introdutor de ar nos resultados.

4.1. Baridade dos ligantes e agregados

O ensaio de determinação de baridade foi aplicado aos ligantes e aos agregados utilizados no desenvolvimento experimental. No quadro 4.1. apresentam-se os resultados obtidos. Os valores apresentados são a média e o desvio padrão dos 3 ensaios realizados para cada material. Foi com base nos valores de baridade obtidos para os ligantes e agregados que se estabeleceram as quantidades dos vários materiais a utilizar nas argamassas.

Quadro 4.1. – Quadro de baridades de ligantes e agregados

Material	Baridade [g/cm ³]
LIGANTES	
Cal aérea	0,361±0,007
Cal hidráulica	0,852±0,005
Cimento	1,045±0,007
AGREGADOS	
Areia AGS 1/2	1,492±0,006
Areia de rio	1,445±0,005
Areia FPS 120	1,315±0,002

4.2. Consistência das argamassas

As argamassas realizadas no desenvolvimento experimental deste trabalho foram concebidas para obter 2 tipos de consistência, ou seja, para cada combinação de ligante e agregado foram concebidas 2 argamassas diferentes, uma com maior consistência (menor quantidade de água) e outra com menor consistência (maior quantidade de água). A consistência das argamassas foi determinada e controlada por meio do ensaio de espalhamento. Desta forma, é possível avaliar comparativamente as argamassas em função do tipo de ligante, agregado e quantidade de água. Os 2 valores de consistência adoptados foram, em termos de ensaio de espalhamento:

- Espalhamento de 55%: intervalo 52%-58%
- Espalhamento de 75%: intervalo 72%-78%

O ensaio de consistência por espalhamento é um ensaio pouco preciso e bastante sensível, pois tem associado vários factores que podem alterar os valores do ensaio como, acomodação da argamassa dentro do molde tronco-cónico, a correcta mistura dos vários componentes, ritmo das pancadas da mesa de espalhamento, entre outros. Por estas razões, foram adoptados os intervalos referidos para admitir como válidos os resultados do ensaio.

Relativamente às argamassas com recurso à utilização de introdutor de ar, estas não são mais do que repetições de algumas argamassas já concebidas previamente, com a diferença da utilização deste produto. Desta forma, nestas argamassas utilizou-se a mesma quantidade de água de amassadura determinada para as argamassas sem adjuvante, de modo a ser possível avaliar a influência da utilização deste produto. No quadro 4.2. apresentam-se as quantidades de água e os valores de espalhamento de cada argamassa.

Quadro 4.2. – Quantidades de água e valores de espalhamento das argamassas

Referência de espalhamento: 55%	Argamassa	Qtd. de água [ml]	Espalhamento [%]
	st1a	900	53%
	st1r	910	58%
	st1f	1000	56%
	st2a	634	57%
	st2r	878	52%
	st2f	1248	54%
	st3a	543	57%
	st3r	813	57%
	st3f	1089	55%
Referência de espalhamento: 75%	Argamassa	Qtd. de água [ml]	Espalhamento [%]
	ST1A	917	72%
	ST1R	975	76%
	ST1F	1098	72%
	ST2A	813	73%
	ST2R	933	74%
	ST2F	1316	77%
	ST3A	742	78%
	ST3R	845	75%
	ST3F	1150	73%
	Argamassa	Qtd. de água [ml]	Espalhamento [%]
	ST1R+	975	97%
	ST2R+	933	104%
	ST3R+	845	94%

A observação do quadro permite fazer algumas considerações importantes. Em primeiro lugar, para argamassas com o mesmo tipo de ligante mas agregados diferentes, observa-se que a quantidade de água necessária utilizar para obter o mesmo tipo de trabalhabilidade é diferente. A quantidade de água aumenta à medida que a dimensão do agregado diminui. Este facto verifica-se para todas as argamassas de diferentes ligantes. Estes resultados confirmam as conclusões obtidas em trabalhos anteriores, onde se verificou o mesmo tipo de comportamento. B.V. Reddy [44], tal como outros autores, indicam a maior superfície específica das areias finas como explicação para este facto.

Os resultados do ensaio de consistência por espalhamento permitem ainda observar o efeito produzido pela utilização do introdutor de ar na consistência das argamassas. A figura 4.1. mostra os resultados do ensaio de consistência por espalhamento em argamassas de constituição semelhante, em termos de material sólido e água, mas com a diferença da utilização ou não de introdutor de ar.

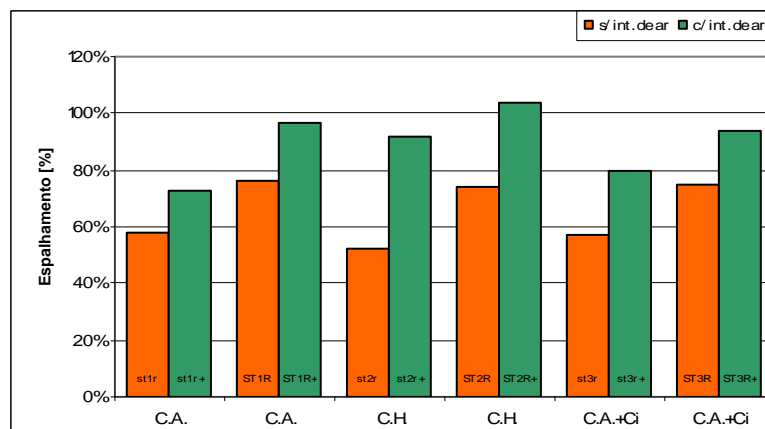


Figura 4.1. – Comparação de resultados de ensaio de espalhamento de argamassas com e sem introdutor de ar (C.A. – cal aérea; C.H. – cal hidráulica; Ci – cimento)

É fácil perceber através do gráfico que a utilização do introdutor de ar nas argamassas produz um aumento significativo da trabalhabilidade. Poderia pensar-se que este aumento de trabalhabilidade fosse devido ao aumento de material líquido nas argamassas, uma vez que é sob esta forma que o introdutor se apresenta. No entanto, a quantidade de produto adicionado às argamassas pode considerar-se praticamente insignificante, comparativamente à quantidade de água utilizada. Desta forma, confirma-se o efeito referido na ficha técnica do produto e referido também por diversos autores, de que a utilização deste tipo de produtos ao criar espaços vazios de reduzidas dimensões no interior das argamassas, diminui o atrito entre as diversas partículas das argamassas e desta forma aumenta a trabalhabilidade.

4.3. Porosidade aberta e massa volúmica

O ensaio de porosidade aberta permite quantificar o valor da porosidade das argamassas. Desta forma obtém-se informação sobre a quantidade de poros presentes no interior da argamassa que têm ligação ao exterior e conexão com outros poros. Para além da porosidade aberta, existe também a porosidade fechada, cuja expressão é muito inferior à da aberta. Desta forma, admite-se que a porosidade aberta é aquela que influencia de maneira mais significativa o comportamento das argamassas. Esta tem influência, principalmente, nas resistências mecânicas das argamassas e também nos principais mecanismos de degradação a que estas estão sujeitas. Assim, um conhecimento desta característica é fundamental para uma avaliação da durabilidade das argamassas.

Durante o ensaio de determinação da porosidade aberta o ambiente no interior do exsicador é sujeito à acção de uma bomba que retira o ar do aparelho. Desta forma é retirado grande parte do ar presente no interior dos poros das argamassas e quando se introduz água no interior do exsicador esta consegue penetrar mais facilmente e em maior quantidade nos poros das argamassas, pois existe uma menor pressão. Este procedimento permite obter valores de porosidade mais precisos do que aqueles que seriam fornecidos pela simples imersão dos provetes em água.

Os resultados apresentados no quadro 4.3. resultam da realização de ensaios efectuados a 3 provetes para cada uma das argamassas. Como já foi referido, estes provetes têm origem no material que sobra dos provetes ensaiados à compressão.

Quadro 4.3. – Porosidades e massas volúmicas aparentes das argamassas

Argamassas	Porosidade [%]	M. Volúmica [kg/m ³]	Argamassas	Porosidade [%]	M. Volúmica [kg/m ³]
st1a	31±1%	1795±15	ST1A	31±0%	1782±6
st1r	34±0%	1717±10	ST1R	34±0%	1718±5
st1f	37±0%	1660±7	ST1F	38±0%	1632±9
st2a	28±0%	1898±1	ST2A	29±1%	1855±13
st2r	32±0%	1778±9	ST2R	32±0%	1783±5
st2f	39±0%	1602±5	ST2F	39±0%	1604±6
st3a	27±0%	1916±13	ST3A	30±1%	1856±25
st3r	32±0%	1797±2	ST3R	30±1%	1827±16
st3f	37±0%	1666±10	ST3F	37±0%	1656±0
st1r+	34±0%	1717±2	ST1R+	35±0%	1707±8
st2r+	33±0%	1739±6	ST2R+	34±0%	1734±5
st3r+	33±0%	1785±33	ST3R+	32±0%	1786±6

Para uma melhor visualização dos resultados e evoluções a figura 4.2. representa os valores de porosidade das várias argamassas. Os resultados agrupam-se por argamassas de ligantes iguais, incluindo os diferentes tipos de areia e as diferentes quantidades de água, excepto os resultados das argamassas com introdutor de ar, que se agrupam todos no mesmo gráfico.

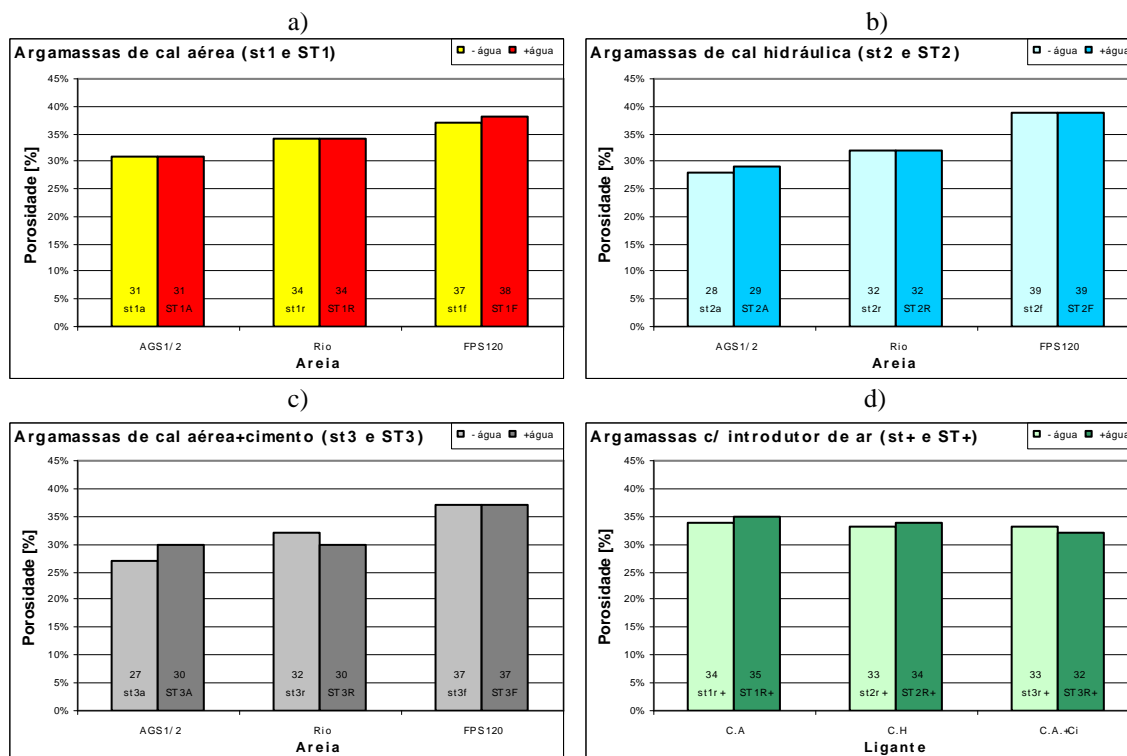


Figura 4.2. – Porosidades das argamassas com diferentes quantidades de água. a) Cal aérea; b) Cal hidráulica; c) Cal aérea+cimento; d) Argamassas com introdutor de ar. (C.A. – cal aérea; C.H. – cal hidráulica; C.A.+Ci – cal aérea+cimento)

A observação das figuras 4.2.a), b) e c) permite concluir que a porosidade das argamassas aumenta à medida que a dimensão do agregado diminui. Este facto verifica-se para argamassas de qualquer um dos tipos de ligante. Confirma-se assim as conclusões obtidas por outros autores que referem o mesmo efeito. Observa-se também que, em termos genéricos, as argamassas com a utilização de cimento apresentam os valores mais baixos de porosidade.

Relativamente ao efeito de diferentes quantidades de água na porosidade das argamassas, parece registar-se a tendência de o aumento de água se traduzir numa manutenção ou incremento da porosidade. Esta tendência é contrariada pelas argamassas bastardas (cal aérea+cimento) com areia de rio, com e sem introdução de ar. Pensa-se que estes 2 resultados sejam fortuitos, uma vez que as mesmas argamassas com as restantes areias apresentam tendência para aumentar a porosidade com o aumento da quantidade de água. Apesar de algumas argamassas com maior quantidade de água apresentarem valores de porosidade igual ao das argamassas com menor quantidade de água, uma observação dos valores de massa volúmica aparente destas argamassas, no quadro 4.3. permite constatar que estes são, em geral, mais baixos ou

muito próximos, o que indicia a tendência do aumento de porosidade com maior quantidade de água. A mesma situação se verifica para as argamassas que exibiram valores de porosidade menores, apesar de maiores quantidades de água.

Esperavam-se diferenças maiores nos valores da porosidade das argamassas com diferentes quantidades de água. Os resultados obtidos indicam somente uma tendência, e não resultados claros de isso acontecer. Assim, não se confirma neste desenvolvimento experimental as conclusões obtidas por diversos autores, que um aumento de água das argamassas resulta num aumento da porosidade. No entanto, parece haver algumas explicações para estes resultados inesperados. Uma primeira explicação para a obtenção de valores tão próximos de porosidade, em argamassas com diferentes quantidades de água, pode ser o reduzido número de amostras utilizado no desenvolvimento experimental. Para cada argamassa foram utilizadas 3 amostras, que para além de não serem todas iguais, pois resultam de material de sobra de outro ensaio, são também de dimensões reduzidas. Estes dois factos podem fazer com que a diferença dos valores de porosidade seja atenuada. Uma segunda explicação pode ser a operação manual de mistura das argamassas aquando da sua colocação nos moldes. A mistura pode não ser suficientemente bem conseguida, havendo uma distribuição deficiente da água na mistura. Uma terceira explicação, que parece ser a mais lógica, é que a operação de compactação das argamassas origine uma diminuição da porosidade das argamassas, tal como referido por A. S. Coutinho [8], e M. Stefanidou e I. Papayianni [50]. A compactação, para além de diminuir a quantidade de ar no interior das argamassas, faz também assentar o material sólido relativamente ao líquido, que se desloca para a superfície.

A figura 4.3. compara os valores de porosidade exibidos por argamassas de constituição sólida semelhante, bem como quantidades de água, mas com a diferença da utilização ou não de introdutor de ar.

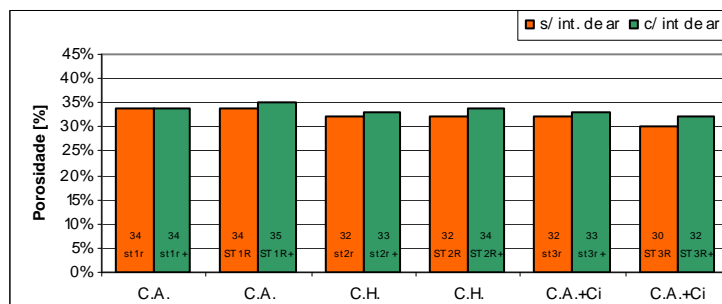


Figura 4.3. – Comparação de valores de porosidade de argamassas com e sem introdutor de ar.
(C.A. – cal aérea; C.H. – cal hidráulica; C.A.+Ci – cal aérea+cimento)

Como é possível observar pela figura, as argamassas com utilização de introdutor de ar apresentam valores de porosidade maiores do que as argamassas sem a utilização deste produto. Ainda assim, a diferença entre os valores nunca excede os 2%, facto que pode estar relacionado, mais uma vez, com as explicações já referidas para as pequenas diferenças entre valores de porosidade.

4.4. Módulo de elasticidade dinâmico

O módulo de elasticidade dinâmico das argamassas permite avaliar a deformabilidade dos materiais. Módulos de elasticidade baixos correspondem a materiais com maior deformabilidade, ao invés de módulos de elasticidade elevados que correspondem a materiais de maior rigidez. Para além disto, o módulo de elasticidade está relacionado com as resistências mecânicas das argamassas, sendo que um módulo de elasticidade mais elevado evidencia, normalmente, resistências mecânicas superiores. Neste desenvolvimento experimental a determinação do módulo de elasticidade foi efectuada pelo método dinâmico, que se caracteriza por ser um método não destrutivo, ao contrário do que acontece com o método estático. No entanto, os resultados obtidos pelo método estático são bastante mais precisos do que aqueles obtidos pelo método dinâmico.

O valor de módulo de elasticidade dinâmico apresentado para cada uma das argamassas é o resultado da realização de ensaios a 3 provetes semelhantes. Cada um dos 3 provetes foi ensaiado em duas posições diferentes, tal como explicado no ponto 3.2.4.. O quadro 4.4. sintetiza os resultados do ensaio para as várias argamassas.

Quadro 4.4. – Valores dos módulos de elasticidade dinâmicos das argamassas

Argamassas	E _{dinâmico} [MPa]	Argamassas	E _{dinâmico} [MPa]
st1a	1345±11	ST1A	1487±55
st1r	2390±70	ST1R	2179±112
st1f	2707±21	ST1F	2703±24
st2a	4670±220	ST2A	4493±1879
st2r	5982±87	ST2R	2559±30
st2f	4646±81	ST2F	4568±87
st3a	7113±111	ST3A	4515±301
st3r	5203±192	ST3R	4935±241
st3f	3606±76	ST3F	3264±35
st1r+	2181±57	ST1R+	1978±10
st2r+	4957±1635	ST2R+	1384±1000
st3r+	5012±288	ST3R+	4681±15

Antes de se proceder à análise dos resultados do quadro importa referir alguns aspectos. O equipamento utilizado no ensaio de determinação do módulo de elasticidade dinâmico é bastante sensível e os resultados que fornece dependem muito do manuseamento do operador. Deve encarar-se, por isso, os resultados expostos numa perspectiva qualitativa e de comparação e não numa perspectiva quantitativa e de precisão de resultados. Por vezes, em provetes iguais obtêm-se valores de módulo de elasticidade muito díspares, exactamente pela grande sensibilidade do equipamento e também devido ao erro humano introduzido pelo operador. Cada determinação do módulo de elasticidade é diferente das restantes e isto pode dever-se a vários aspectos: o alinhamento dos provetes no equipamento é diferente em cada medição, o contacto dos provetes com a sonda emissora depende do tipo de provetes que se está a ensaiar, principalmente a sua fragilidade, a distância da sonda receptora ao provete é diferente em cada ensaio, para além de que um pequeno toque nesta sonda origina medições diferentes, entre outros.

Feitos estes reparos, apresentam-se na figura 4.4., sob a forma de gráfico, os resultados das várias argamassas, para uma melhor visualização e análise. Os resultados encontram-se agrupados por argamassas com o mesmo ligante, variando o tipo de areia e a quantidade de água, excepto no caso das argamassas com utilização de introdutor de ar, que se apresentam todas no mesmo gráfico.

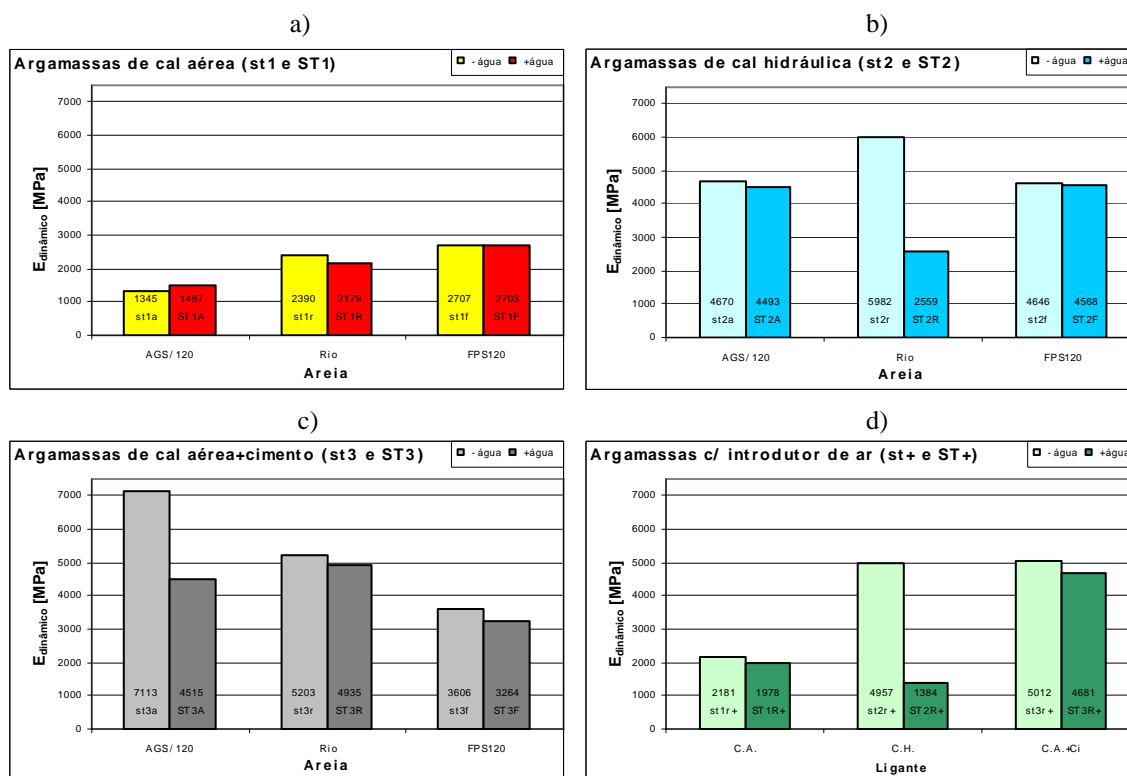


Figura 4.4. – Módulos de elasticidade dinâmicos das argamassas. a) Argamassas de cal aérea; b) Argamassas de cal hidráulica; c) Argamassas de cal aérea+cimento; d) Argamassas com introdutor de ar. (C.A. – cal aérea; C.H. – cal hidráulica; C.A.+Ci – cal aérea+cimento)

A análise da figura 4.4. permite observar que as argamassas de cal aérea (st1 e ST1) apresentam os valores mais baixos de módulo de elasticidade, o que confirma a opinião geral de que estas argamassas são as mais flexíveis e deformáveis. A análise da figura 4.4. c) mostra que a adição de cimento à cal aérea permite aumentar substancialmente o módulo de elasticidade das argamassas, colocando-as aproximadamente ao nível das argamassas de cal hidráulica. Obviamente, a aproximação depende das quantidades de cal aérea e cimento.

A análise das figuras 4.4. a), b), c) e d) permite estabelecer uma tendência generalizada, de que o aumento de água em argamassas de constituição semelhante origina uma redução do módulo de elasticidade. Esta tendência é somente contrariada no caso das argamassas de cal aérea com utilização de areia AGS 1/2. Este facto pode estar relacionado com as quantidades de água bastante próximas que se utilizaram na execução deste tipo de argamassas.

A evolução do módulo de elasticidade com a dimensão do agregado é bastante variável. Nas argamassas de cal aérea, nota-se uma tendência de aumento do módulo de elasticidade com a diminuição das dimensões do agregado. Ao contrário, nas argamassas de cal aérea e cimento (st3 e ST3) o módulo de elasticidade tende a decrescer com a diminuição de dimensões do agregado. Com base nestas afirmações é fácil perceber que o cimento é o responsável pela inversão de tendência que se verifica. Relativamente às argamassas de cal hidráulica (st2 e ST2) torna-se difícil estabelecer uma tendência geral, principalmente por culpa do comportamento das argamassas com utilização de areia de rio que originaram resultados muito díspares. Deixando as argamassas com utilização de areia de rio um pouco à margem da análise, as restantes argamassas, apesar de exibirem valores bastante próximos, parecem indicar que se verifica uma ligeira tendência semelhante àquela que se regista para as argamassas bastardas. De resto, esta tendência é a verificada habitualmente em argamassas de ligantes hidráulicos [43].

A figura 4.5. faz a comparação entre os módulos de elasticidade dinâmicos de argamassas de constituição e quantidade de água semelhantes, mas com a diferença de utilização ou não de introdutor de ar.

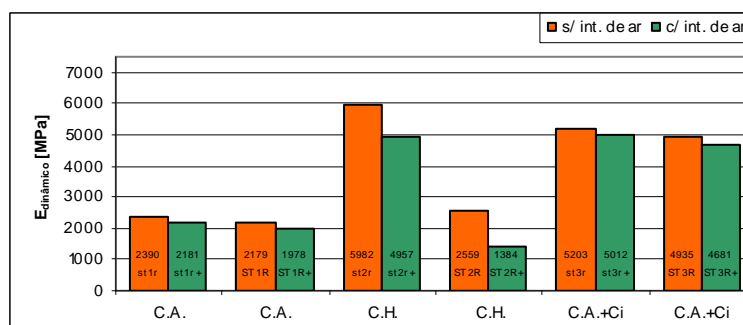


Figura 4.5. – Comparação de valores de módulo de elasticidade dinâmico de argamassas com e sem utilização de introdutor de ar.
(C.A. – cal aérea; C.H. – cal hidráulica; C.A.+Ci – cal aérea+cimento)

A figura 4.5. mostra que a utilização do introdutor de ar faz com que o módulo de elasticidade das argamassas diminua. Este facto verifica-se para o conjunto das argamassas, revelando uma influência semelhante à da adição de maior quantidade de água nas argamassas.

4.5. Resistências à flexão e compressão das argamassas

O conhecimento das resistências mecânicas das argamassas constitui sempre um dado importante da sua caracterização. A maior parte do estudo efectuado em argamassas prende-se com a sua durabilidade, directa ou indirectamente. Como é óbvio e ficou patente no capítulo 2 deste trabalho, as resistências mecânicas são o factor mais importante na capacidade resistente das argamassas à degradação. Por esta razão, a grande parte das investigações realizadas, relativas ao estudo das argamassas, inclui informação acerca de resistências mecânicas.

Como já foi referido nos pontos 3.2.5 e 3.2.6, o equipamento utilizado nos ensaios de resistência à flexão e compressão é o mesmo com excepção de algumas peças particulares. Em primeiro lugar são efectuados os ensaios de resistência à flexão e com as metades de provete resultantes desse ensaio realizam-se os ensaios de resistência à compressão. No quadro 4.5. apresentam-se os resultados dos ensaios de flexão e compressão das argamassas realizadas. Os valores obtidos para cada argamassa resultam de ensaios realizados a 3 provetes semelhantes.

Quadro 4.5. – Valores de resistência à flexão e compressão das argamassas

Argamassa	R. flexão [MPa]	R. compressão [MPa]	Argamassa	R. flexão [MPa]	R. compressão [MPa]
st1a	0,14±0,02	0,43±0,01	ST1A	0,17±0,01	0,46±0,02
st1r	0,38±0,02	1,13±0,06	ST1R	0,30±0,04	1,01±0,07
st1f	0,54±0,01	2,29±0,11	ST1F	0,58±0,06	2,23±0,06
st2a	0,18±0,02	1,20±0,10	ST2A	0,11±0,02	0,53±0,05
st2r	0,14±0,01	0,51±0,02	ST2R	0,13±0,01	0,43±0,01
st2f	0,37±0,04	0,83±0,04	ST2F	0,34±0,02	0,79±0,08
st3a	1,04±0,15	6,88±0,15	ST3A	0,76±0,02	3,95±0,62
st3r	1,11±0,04	5,67±0,69	ST3R	1,05±0,12	4,89±0,25
st3f	1,26±0,08	5,82±0,37	ST3F	1,35±0,04	5,00±0,03
st1r+	0,30±0,01	1,24±0,01	ST1R+	0,26±0,03	1,04±0,05
st2r+	0,13±0,01	0,56±0,04	ST2R+	0,11±0,01	0,52±0,03
st3r+	1,07±0,08	5,29±0,04	ST3R+	0,93±0,02	5,13±0,20

As figuras 4.6. e 4.7. apresentam os valores de resistência à flexão e compressão, respectivamente, sob a forma de gráfico. Desta forma torna-se mais fácil a percepção dos resultados e tendências evidenciadas, para além de facilitar o acompanhamento da análise. Os resultados agrupam-se por argamassas com o mesmo tipo de ligante,

variando o tipo de areia e quantidades de água, excepto no caso das argamassas com utilização de introdutor de ar, cujos resultados são apresentados todos conjuntamente.

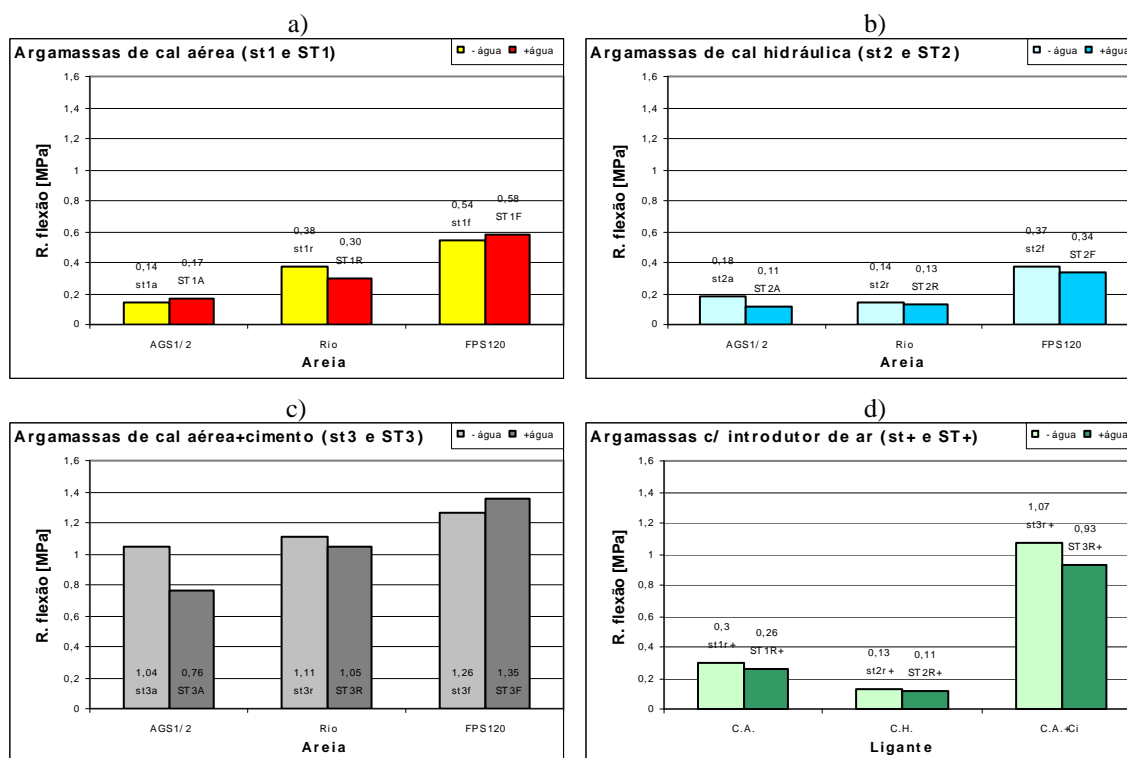


Figura 4.6. – Resistências à flexão das argamassas. a) Argamassas de cal aérea; b) Argamassas de cal hidráulica; c) Argamassas de cal aérea+cimento; d) Argamassas com introdutor de ar. (C.A. – cal aérea; C.H. – cal hidráulica; C.A.+Ci – cal aérea+cimento)

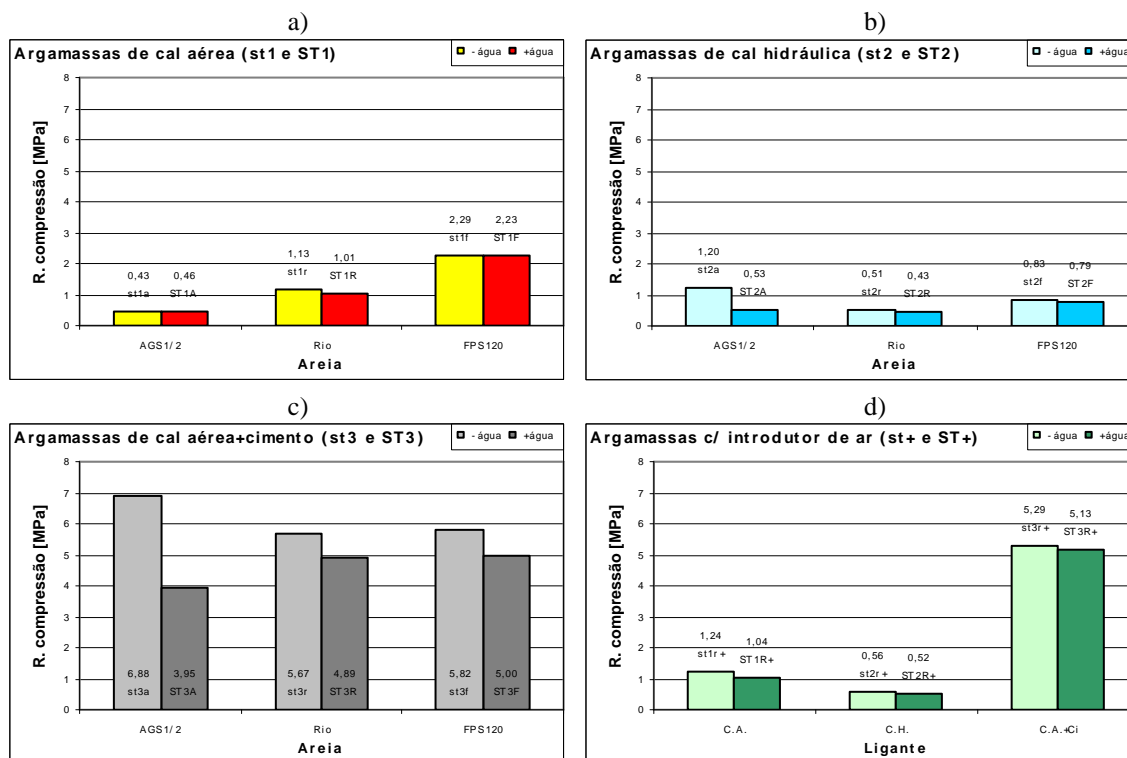


Figura 4.7. – Resistências à compressão das argamassas. a) Argamassas de cal aérea; b) Argamassas de cal hidráulica; c) Argamassas de cal aérea+cimento; d) Argamassas com introdutor de ar. (C.A. – cal aérea; C.H. – cal hidráulica; C.A.+Ci – cal aérea+cimento)

Começando por analisar a figura 4.6., podemos observar que se regista uma tendência para o aumento da resistência à flexão das argamassas à medida que a dimensão do agregado diminui. Estes resultados contrariam a opinião de alguns autores, que defendem que o uso de agregados de maiores dimensões melhora as resistências mecânicas das argamassas, tal como avançado no ponto 2.2.4.. A tendência registada é somente contrariada pela argamassa de cal hidráulica com areia AGS 1/2 e menor quantidade de água (st2a), que exibiu uma resistência à flexão superior a qualquer uma das argamassas de cal hidráulica com utilização de areia de rio (st2r e ST2R). Este resultado deixa em aberto a possibilidade de os agregados maiores aumentarem as resistências das argamassas, no entanto, pensa-se que esta situação pode ser válida somente dentro de certos limites de dimensões.

As argamassas bastardas (st3 e ST3) apresentaram os valores de resistência à flexão mais elevados, evidenciando o forte efeito da adição de cimento nas argamassas de cal aérea. No entanto, o resultado mais surpreendente, comparando argamassas de ligantes diferentes, é que as argamassas de cal aérea exibiram valores de resistência à flexão superiores aos das argamassas de cal hidráulica. Para este facto contribui certamente a

diferença de traços entre as duas argamassas, que é mais elevado nas argamassas de cal aérea (1:2 contra 1:3 das argamassas de cal hidráulica). Ainda assim, não deixa de ser importante a diferença entre os valores obtidos para os dois tipos de argamassas, uma vez que a cal hidráulica é uma NHL5, ou seja, o tipo de cal hidráulica com maiores resistências mecânicas.

Relativamente às quantidades de água utilizadas nas argamassas, as argamassas de cal não apresentam uma tendência clara de comportamento de resistência à flexão com o aumento de água, pois as diferenças registadas entre argamassas com diferentes quantidades de água são muito pequenas, e são fortemente contrariadas pelos resultados obtidos nas argamassas com recurso a areia de rio. Observando as figuras 4.6. b), c) e d) fica clara uma tendência de diminuição das resistências à flexão com o aumento da quantidade de água utilizada.

Passando agora à análise da figura 4.7., tal como sucedeu para a resistência à flexão, regista-se uma tendência para o aumento da resistência à compressão das argamassas à medida que a dimensão do agregado diminui. No entanto, existem alguns resultados que contrariam a tendência, como são o caso das argamassas de cal hidráulica e areia AGS 1/2 (st2a e ST2A) e a argamassa bastarda com areia AGS 1/2 e menor quantidade de água. Tal como aconteceu na resistência à flexão, estes resultados podem estar relacionados com a opinião de que agregados maiores aumentam as resistências das argamassas.

Comparando as argamassas relativamente ao tipo de ligante utilizado, registam-se os mesmos resultados obtidos na resistência à flexão, ou seja, as argamassas bastardas exibem as maiores resistências à compressão, seguidas das argamassas de cal aérea e as argamassas de cal hidráulica.

No que diz respeito à quantidade de água utilizada nas argamassas, regista-se uma tendência clara de diminuição da resistência à compressão com o aumento de água. Estes resultados sugerem que a indefinição de comportamento que se registou nas argamassas de cal aérea, no que diz respeito a resistência à flexão, foi fortuita.

A figura 4.8. apresenta uma comparação dos resultados de resistência à flexão e compressão de argamassas de constituição e quantidade de água semelhante, mas com a diferença da utilização ou não de introdutor de ar.

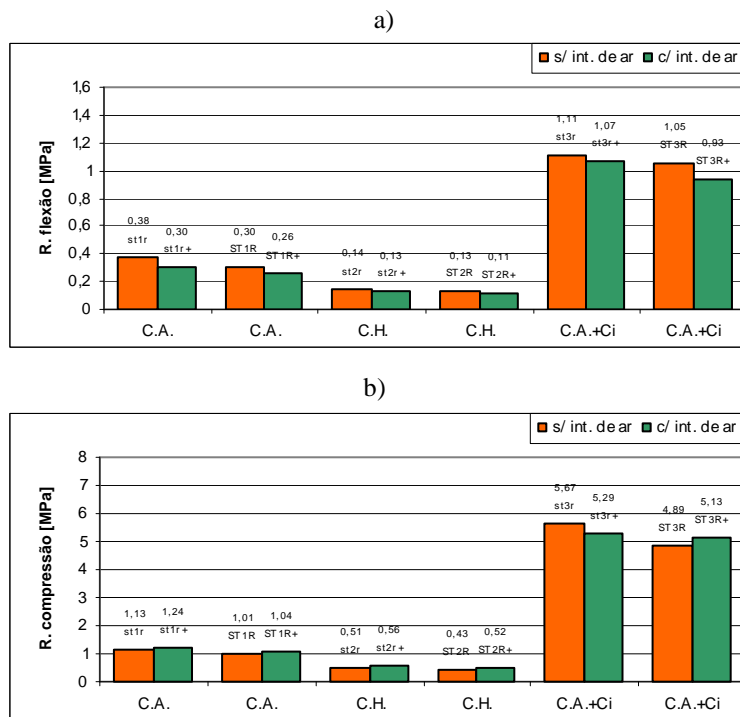


Figura 4.8. – Resistências mecânicas das argamassas. a) Resistência à flexão; b) Resistência à compressão (C.A. – cal aérea; C.H. – cal hidráulica; C.A.+Ci – cal aérea+cimento)

Analisando a figura 4.8. a) observa-se que a utilização do introdutor de ar origina uma redução na resistência à flexão de todas as argamassas. Este resultado era expectável, uma vez que é unanimemente reconhecido este efeito a este tipo de produtos, portanto, os resultados obtidos vêm na linha das investigações realizadas anteriormente.

Relativamente à figura 4.8. b) os resultados são menos consensuais e até surpreendentes. Verifica-se que as argamassas com recurso à utilização de introdutor de ar apresentam, em geral, maiores resistências à compressão do que as argamassas sem utilização deste produto. Este resultado contraria a opinião geral acerca do efeito de introdutores de ar, uma vez que a generalidade das investigações chega a resultados completamente contrários a este. Se para além disto se tiver em conta que, relativamente a argamassas de cal aérea, aquelas com recurso à utilização do introdutor de ar tiveram um tempo de cura inferior, então mais surpreendentes se tornam os resultados. Ainda mais estranho é o facto de se verificarem efeitos diferentes na resistência à flexão e na

resistência à compressão, pois normalmente os resultados dos 2 ensaios apresentam tendências semelhantes. Somente um dos conjuntos de argamassas (st3r e st3r+) apresentou um resultado do tipo que se esperava. Esta situação leva a crer que este produto contém algum composto que permite melhorar o comportamento das argamassas à compressão, ainda que pareça pouco provável. Para um melhor entendimento deste fenómeno seria necessário realizar mais testes em argamassas com este produto.

4.6. Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade constitui o primeiro dos ensaios que avaliam, de forma directa, o comportamento das argamassas relativamente às características de humedecimento e secagem. Este ensaio permite analisar a cinética de absorção de água das argamassas ao longo do tempo, até se atingir o equilíbrio, ou seja, até ao ponto de absorção máxima. Atingido o ponto de absorção máxima de água, é possível determinar-se quais as argamassas que acumulam maior quantidade de água no interior, através do valor assintótico de absorção de água por capilaridade. Relembra-se que do ponto de vista da durabilidade das argamassas, o ensaio de absorção de água por capilaridade constitui um indicador importante, principalmente no que se refere a mecanismos de degradação por ciclos de gelo/degelo. As argamassas com menores coeficientes de absorção e menores valores assintóticos estão mais protegidas deste tipo de degradação.

O quadro 4.6. sintetiza os resultados obtidos pelas várias argamassas neste ensaio. Os valores apresentados para cada argamassa resultam de ensaios realizados a 3 provetes iguais. No entanto, existe uma excepção que é a argamassa de cal hidráulica, com areia de rio, maior quantidade de água e utilização de introdutor de ar (ST2R+). Para esta argamassa os resultados têm origem somente em 2 provetes, pois o terceiro quebrou-se no decorrer do ensaio, não tendo sido considerados válidos os seus resultados.

Quadro 4.6. – Coeficientes de absorção de água por capilaridade e valores assintóticos de absorção das argamassas

Argamassas	C. A. _{capilar} [kg/m ² .s ^{0,5}]	V. A. [kg/m ²]	Argamassas	C. A. _{capilar} [kg/m ² .s ^{0,5}]	V. A. [kg/m ²]
st1a	0,424±0,008	33,728±0,212	ST1A	0,390±0,005	33,975±0,118
st1r	0,240±0,001	35,095±0,439	ST1R	0,261±0,001	36,311±0,411
st1f	0,291±0,005	39,409±0,138	ST1F	0,237±0,006	38,751±0,105
st2a	0,259±0,006	30,807±0,390	ST2A	0,414±0,013	36,496±0,637
st2r	0,373±0,009	40,030±0,229	ST2R	0,431±0,002	42,697±0,473
st2f	0,580±0,011	52,599±0,479	ST2F	0,632±0,024	53,142±0,679
st3a	0,163±0,004	25,593±0,814	ST3A	0,277±0,013	31,604±0,616
st3r	0,274±0,008	37,185±0,705	ST3R	0,300±0,002	38,264±0,073
st3f	0,440±0,021	48,774±0,701	ST3F	0,420±0,021	50,317±0,930
st1r+	0,251±0,002	35,959±0,329	ST1R+	0,265±0,001	36,205±0,198
st2r+	0,327±0,009	36,630±0,086	ST2R+	0,363±0,016	37,738±1,141
st3r+	0,256±0,004	35,739±0,058	ST3R+	0,278±0,005	36,646±0,274

C.A._{capilar} – coeficiente de absorção capilar

V.A. – valor assintótico de absorção

A figura 4.9. representa a evolução da absorção de água por capilaridade das argamassas em função do tempo. Os resultados agrupam-se por argamassas do mesmo ligante e mesma quantidade de água. Nestes resultados incluem-se também as argamassas com utilização de introdutor de ar. Encontram-se em anexo gráficos adicionais destes resultados, que permitem um melhor entendimento e visualização das tendências evidenciadas [Anexo 2], facilitando a análise.

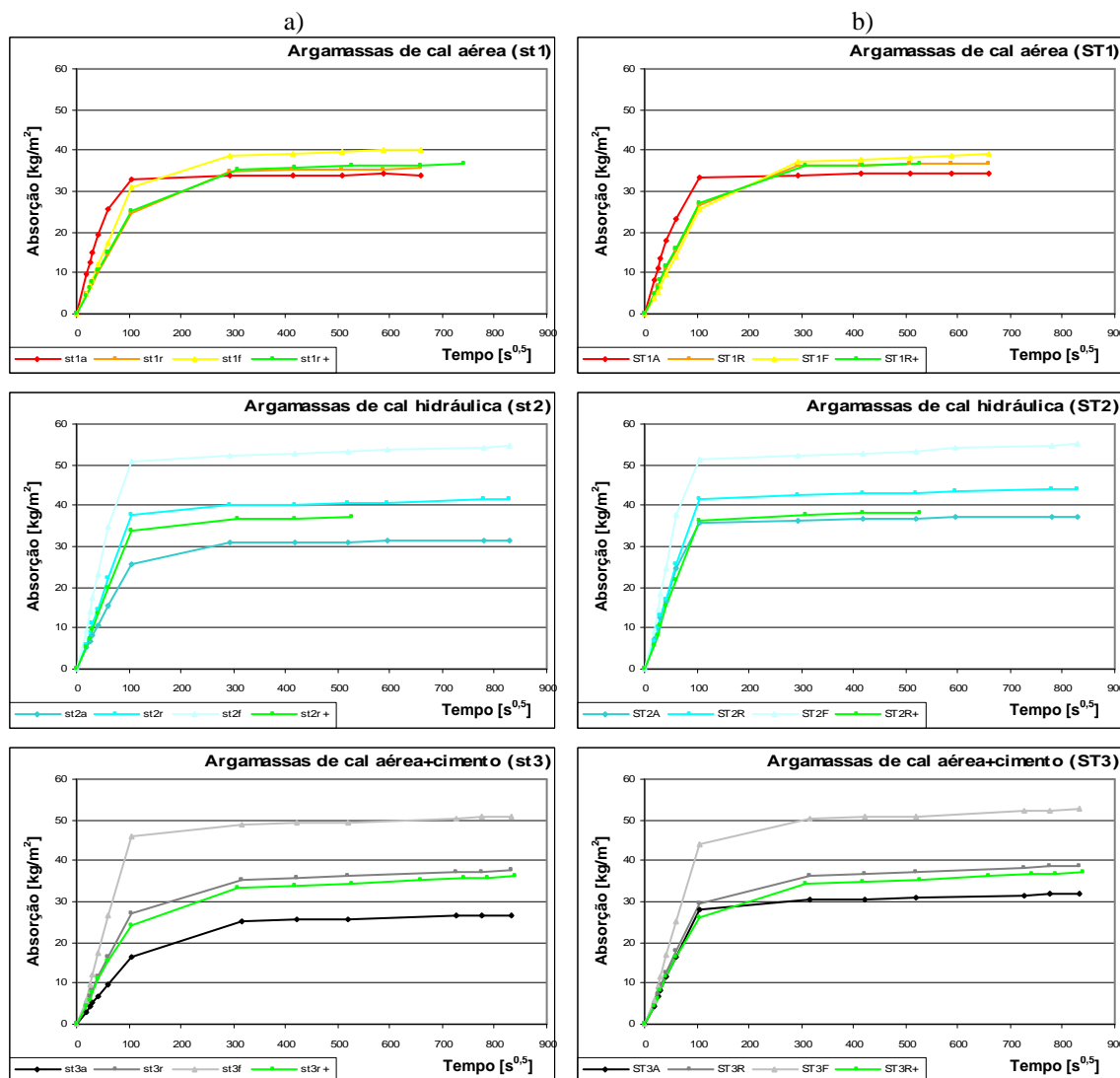


Figura 4.9. – Gráficos de evolução da absorção de água por capilaridade das argamassas, em função do tempo.

a) Argamassas com menor quantidade de água; b) Argamassas com maior quantidade de água

Começando por analisar os resultados relativos ao coeficiente de absorção por capilaridade, as argamassas de ligante aéreo parecem evidenciar um tipo de tendência diferente das argamassas com ligantes hidráulicos. Assim, nas argamassas de cal aérea, o coeficiente de absorção capilar tende a diminuir com a diminuição da dimensão do agregado, enquanto nas restantes argamassas a tendência é contrária, ou seja, o coeficiente de absorção capilar tende a aumentar quando a dimensão do agregado diminui.

A quantidade de água das argamassas parece ter também um efeito diferente nas argamassas de ligante aéreo e nas argamassas com ligantes hidráulicos. Em termos gerais, existe uma tendência para um aumento do coeficiente de absorção de água por

capilaridade com o aumento de água. No entanto, as argamassas de cal aérea com areia AGS 1/2 e areia FPS 120 evidenciaram um comportamento contrário. Também a argamassa bastarda com areia FPS 120 mostrou o mesmo tipo de comportamento. No entanto, neste último caso pensa-se que este resultado pode dever-se a uma possível deficiente manutenção da lâmina de água para absorção, uma vez que os restantes resultados evidenciados por argamassas com ligantes hidráulicos mostram uma tendência contrária.

Relativamente à utilização de introdutor de ar, voltam a registar-se tendências contrárias no caso de ligantes aéreos e ligantes hidráulicos. Assim, nas argamassas de cal aérea, a utilização do introdutor originou um aumento muito ligeiro do coeficiente de absorção de água por capilaridade, mantendo-se os valores praticamente iguais. Já nas argamassas de cal hidráulica e bastardas, a utilização do introdutor de ar originou uma diminuição do coeficiente, confirmando-se nestes casos a informação da ficha técnica do produto, que faz referência a este efeito. Também a opinião geral refere este tipo de comportamento acerca dos introdutores de ar, ou seja, que diminuem a velocidade de absorção de água por capilaridade.

A ausência de efeito do introdutor de ar nas argamassas de cal aérea pode ser explicada por a evolução e desenvolvimento dos introdutores de ar ser direccionada para ligantes hidráulicos, mais precisamente o cimento e não produzir o mesmo efeito em ligantes aéreos. Para além disso, a ausência de efeito pode estar também relacionada com o tipo de porosidade das argamassas de cal aérea, que é um pouco diferente da porosidade das argamassas de ligantes hidráulicos (tipo e dimensões).

Analisando agora o valor assintótico de absorção de água por capilaridade, observa-se que as argamassas apresentam uma tendência generalizada de aumento com a diminuição das dimensões do agregado. Esta tendência é menos acentuada nas argamassas de cal aérea. De uma forma geral, as argamassas de cal hidráulica são as que exibem maiores valores assintóticos de absorção de água por capilaridade.

Relativamente à quantidade de água das argamassas, regista-se novamente uma tendência generalizada para o aumento dos valores assintóticos com o aumento da

quantidade de água de amassadura. Este aumento é menos acentuado nas argamassas de cal aérea.

A utilização de introdutor de ar origina uma tendência generalizada de diminuição do valor assintótico de absorção de água por capilaridade das argamassas. Esta tendência é praticamente nula nas argamassas de cal aérea, sendo que para a argamassa de cal aérea com menor quantidade de água chega mesmo a haver uma inversão da tendência. Estes resultados vêm na linha dos obtidos relativamente ao coeficiente de absorção de água por capilaridade, ou seja, uma ausência de efeito do introdutor de ar em argamassas de cal aérea.

4.7. Permeabilidade ao vapor de água

A permeabilidade ao vapor de água é o indicador que fornece informação sobre a facilidade de transporte de vapor no interior das argamassas. Na literatura é referida a relação entre este indicador e a capacidade de secagem das argamassas, o que o torna especialmente importante.

O quadro 4.7. sintetiza os resultados obtidos por cada argamassa. Os valores de cada argamassa têm origem nos resultados obtidos no ensaio de 3 provetes semelhantes. No entanto, para a argamassa de cal aérea com areia AGS 1/2 e menor quantidade de água, (st1a), o valor obtido corresponde aos resultados efectuados em 2 provetes, uma vez que o terceiro quebrou-se aquando da sua introdução na cápsula.

Antes da apresentação dos resultados, é importante referir alguns aspectos deste ensaio. Registaram-se algumas dificuldades durante a realização de alguns ensaios de permeabilidade, nomeadamente no que diz respeito às argamassas de cal hidráulica. O silicone utilizado no ensaio destas argamassas revelou um comportamento atípico. Este material evidenciou uma maior rigidez relativamente ao utilizado no ensaio de outras argamassas e também algum grau de retracção. Pensa-se que a rigidez e retracção se deveram às condições da câmara climática de ensaio. Este comportamento do silicone resultou em alguns problemas nas argamassas. Assim, nos provetes com areia AGS 1/2 e maior quantidade de água (ST2A), a retracção do silicone originou fissuração dos

provetes. Nos provetes com areia FPS 120, a retracção do silicone fez com que este descolasse da bolacha. Nos restantes provetes não foi visível nenhuma anomalia, no entanto, não se pode garantir que o seu comportamento não tenha sido afectado.



Figura 4.10. – Anomalias em provetes, derivadas do comportamento do silicone. a) Fissuração de provetes, derivada da retracção do silicone; b) Descolagem do silicone, devido a retracção

Por esta razão, utilizou-se, sempre que possível, as primeiras medições a fluxo constante das argamassas para obter os resultados, numa tentativa de conseguir evitar ao máximo a influência do comportamento do silicone. Obviamente aplicou-se este procedimento à totalidade das argamassas do desenvolvimento experimental, para ser possível a comparação de resultados. Este procedimento pode fornecer resultados menos fidedignos, uma vez que o regime estacionário se encontrava estabelecido há relativamente pouco tempo, originando normalmente valores um pouco mais elevados. Deve notar-se que nas restantes argamassas não se consegue garantir que não ocorreram anomalias, somente se consegue garantir que não se registaram anomalias visíveis.

Quadro 4.7. – Coeficientes de difusão de vapor de água das argamassas

Argamassas	$\pi \times 10^{-11}$ [kg/m.s.Pa]	Argamassas	$\pi \times 10^{-11}$ [kg/m.s.Pa]
st1a	2,09±0,067	ST1A	1,89±0,018
st1r	1,80±0,045	ST1R	1,92±0,076
st1f	1,95±0,059	ST1F	2,08±0,026
st2a	1,96±0,095	ST2A	2,17±0,073
st2r	1,97±0,077	ST2R	1,96±0,082
st2f	2,62±0,095	ST2F	2,71±0,227
st3a	1,51±0,031	ST3A	1,61±0,034
st3r	1,67±0,019	ST3R	1,74±0,046
st3f	1,87±0,070	ST3F	1,96±0,058
st1r+	1,79±0,063	ST1R+	1,97±0,028
st2r+	1,88±0,057	ST2R+	1,95±0,050
st3r+	1,83±0,041	ST3R+	1,96±0,042

π – coeficiente de difusão de vapor de água

A figura 4.11. apresenta os valores de coeficiente de difusão de vapor de água das argamassas sob a forma de gráfico. Desta forma torna-se mais fácil a percepção dos resultados e tendências evidenciadas, para além de facilitar o acompanhamento da análise. Os resultados agrupam-se por argamassas com o mesmo tipo de ligante, variando o tipo de areia e quantidades de água excepto no caso das argamassas com utilização de introdutor de ar, cujos resultados são apresentados todos conjuntamente.

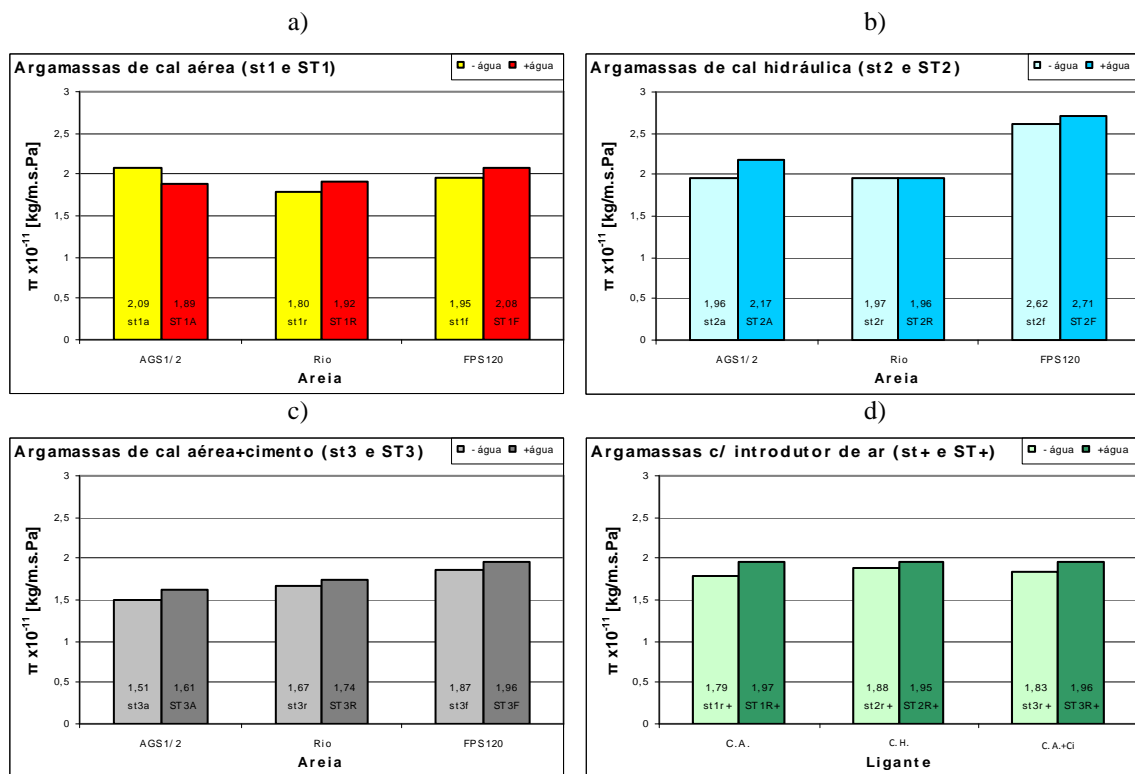


Figura 4.11. – Valores de coeficiente de difusão de vapor de água das argamassas. a) Argamassas de cal aérea; b) Argamassas de cal hidráulica; c) Argamassas de cal aérea+cimento; d) Argamassas com introdutor de ar. (C.A. – cal aérea; C.H. – cal hidráulica; C.A.+Ci – cal aérea+cimento)

A figura 4.12. apresenta, sob a forma de gráfico, a comparação dos valores de coeficiente de difusão de vapor de água entre argamassas de constituição e quantidade de água semelhantes, mas com a diferença da utilização ou não de introdutor de ar.

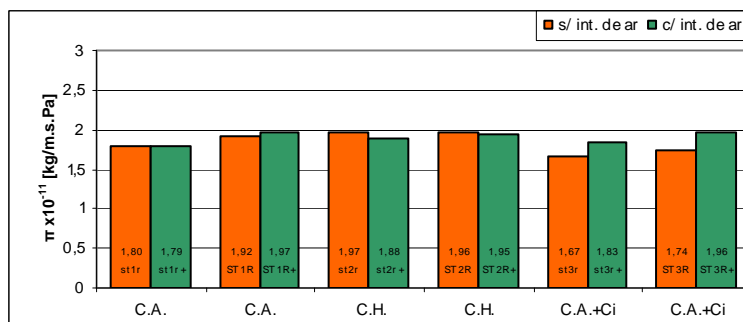


Figura 4.12. – Valores de coeficientes de difusão de vapor de água de argamassas com e sem utilização de introdutor de ar (C.A. – cal aérea; C.H. – cal hidráulica; C.A.+Ci – cal aérea+cimento)

Analisando a influência da dimensão do agregado nos valores do coeficiente de difusão de vapor de água das argamassas, pode estabelecer-se que este tende a aumentar com a diminuição da dimensão do agregado. Esta tendência não é clara pela simples observação dos dados do quadro 4.7. e da figura 4.11. a), b) e c). No entanto, as argamassas de cal hidráulica com areia AGS 1/2 e FPS 120 estabeleceram o regime estacionário de fluxo já depois de terem ocorrido as anomalias no silicone nos provetes. Esta situação originou um aumento dos coeficientes de difusão de vapor de água destas argamassas. Assumindo uma redução do coeficiente destas argamassas, em circunstâncias normais, a figura 4.11. b) exibiria uma tendência do tipo da referida e o conjunto dos resultados apresentaria essa tendência generalizada. Esta tendência é contrariada pela argamassa de cal aérea com areia AGS 1/2 e menor quantidade de água, que exibiu um valor mais elevado do que seria esperado.

As argamassas que apresentam menores valores do coeficiente de difusão de vapor de água são as argamassas bastardas (st3 e ST3), confirmando o efeito da adição de cimento às argamassas de cal aérea, que diminui a permeabilidade ao vapor. Relativamente às argamassas mais permeáveis é difícil estabelecer se são as de cal aérea ou as de cal hidráulica, pois para além das argamassas de cal hidráulica terem alcançado valores de coeficiente de difusão de vapor de água mais elevados devido às anomalias, o seu traço é também diferente do das argamassas de cal aérea. Assim, acredita-se que a opinião geral de que as argamassas de cal aérea são mais permeáveis se confirma. Ao contrário do que concluiu Mosquera *et al* [37] no seu trabalho, as argamassas de cal bastardas foram aquelas que estabeleceram o regime constante de fluxo mais rapidamente, seguidas das argamassas de cal aérea e hidráulica, cujo comportamento foi bastante parecido.

Relativamente à quantidade de água das argamassas, a observação da figura 4.11. permite verificar que existe uma tendência generalizada para um aumento do coeficiente de difusão de vapor de água com o aumento da quantidade de água das argamassas. Esta tendência é somente contrariada por 2 resultados, que se acredita não serem representativos.

Relativamente à utilização do introdutor de ar nas argamassas, a observação do quadro 4.7. e da figura 4.12. não permite tirar conclusões claras do efeito da sua utilização. Esta situação deve-se sobretudo à comparação entre as argamassas de cal hidráulica com e sem utilização de introdutor de ar. Como já foi explicado, as argamassas de cal hidráulica sem a utilização de introdutor de ar registaram problemas durante o ensaio, obtendo valores do coeficiente de difusão obtidos que são superiores ao normal. Comparativamente às argamassas com utilização de introdutor de ar, estas argamassas obtiveram valores de coeficiente de difusão de vapor de água superiores. Relativamente às restantes argamassas, parece haver uma tendência para o aumento deste coeficiente com a utilização do introdutor de ar. Nas argamassas de cal aérea o efeito do introdutor de ar não se faz sentir de uma forma evidente, tal como aconteceu relativamente à absorção de água por capilaridade. Nas argamassas bastardas, o efeito do introdutor de ar é evidente, aumentando o coeficiente de difusão de vapor de água. Assim, crê-se que em circunstâncias normais as argamassas de cal hidráulica evidenciassem o mesmo comportamento.

4.8. Secagem das argamassas

A caracterização da secagem das argamassas é um aspecto importante na avaliação do seu comportamento. O conhecimento deste parâmetro é bastante útil, principalmente no que se refere a questões de durabilidade. A caracterização da secagem torna-se especialmente importante na avaliação do comportamento das argamassas a determinados mecanismos de degradação, como por exemplo, a acção de ciclos de gelo/degelo.

No ensaio de secagem realizado no desenvolvimento experimental deste trabalho a caracterização da secagem faz-se por meio do índice de secagem, que fornece a informação sobre a rapidez de secagem das argamassas, sendo tanto maior quanto maior for o índice.

O quadro 4.8. apresenta os resultados obtidos pelas diversas argamassas no ensaio de secagem. Os resultados apresentados para cada argamassa têm origem nos valores obtidos por 3 provetes semelhantes. A excepção a esta regra é a argamassa de cal hidráulica com areia de rio, maior quantidade de água e utilização de introdutor de ar, (ST2R+), cujo resultado tem origem nos valores obtidos por 2 provetes. Esta situação deve-se à quebra de um dos provetes no decorrer do ensaio de capilaridade.

Antes de se proceder à análise dos resultados é importante referir algumas notas. O ensaio de secagem das argamassas desenvolveu-se em duas fases. Numa primeira fase ensaiaram-se as argamassas de cal aérea e de cal hidráulica e mais tarde, numa segunda fase, ensaiaram-se as argamassas de cal aérea e cimento (bastardas) e as argamassas com introdutor de ar. As condições da sala onde se realizaram os ensaios de secagem são controladas por um dispositivo de climatização que controla a humidade relativa e a temperatura. Aquando do ensaio das argamassas de cal aérea e de cal hidráulica as condições da sala mantiveram-se aproximadamente constantes e relativamente dentro dos limites de humidade relativa e temperatura definidos para o ensaio. Quanto ao ensaio das argamassas bastardas e das argamassas com introdutor de ar, registaram-se bastantes dificuldades com o dispositivo de climatização. Inicialmente o dispositivo manteve as condições da sala dentro dos intervalos definidos, mas a determinada altura registou-se uma avaria, que originou o descontrolo da humidade relativa e da temperatura. As condições da sala passaram a sofrer variações com amplitude significativa e certamente afectaram os resultados obtidos pelas argamassas (bastardas e com introdutor de ar).

Quadro 4.8. – Índices de secagem das argamassas

Argamassas	Índice de secagem	Argamassas	Índice de secagem
st1a	0,036±0,001	ST1A	0,042±0,006
st1r	0,055±0,012	ST1R	0,049±0,006
st1f	0,060±0,007	ST1F	0,061±0,007
st2a	0,039±0,001	ST2A	0,046±0,002
st2r	0,043±0,006	ST2R	0,047±0,004
st2f	0,047±0,002	ST2F	0,049±0,001
st3a	0,013±0,001	ST3A	0,013±0,000
st3r	0,014±0,000	ST3R	0,015±0,001
st3f	0,014±0,002	ST3F	0,014±0,000
st1r+	0,030±0,000	ST1R+	0,026±0,001
st2r+	0,032±0,001	ST2R+	0,033±0,000
st3r+	0,023±0,002	ST3R+	0,025±0,001

Apresenta-se de seguida, na figura 4.13., os resultados do quadro 4.8. sobre a forma de gráfico, para uma análise mais fácil dos resultados. Os resultados agrupam-se por argamassas de ligante semelhante, variando o tipo de areia e quantidade de água utilizada. Exceptua-se a apresentação das argamassas com recurso à utilização de introdutor de ar, cujos resultados são todos apresentados num mesmo gráfico.

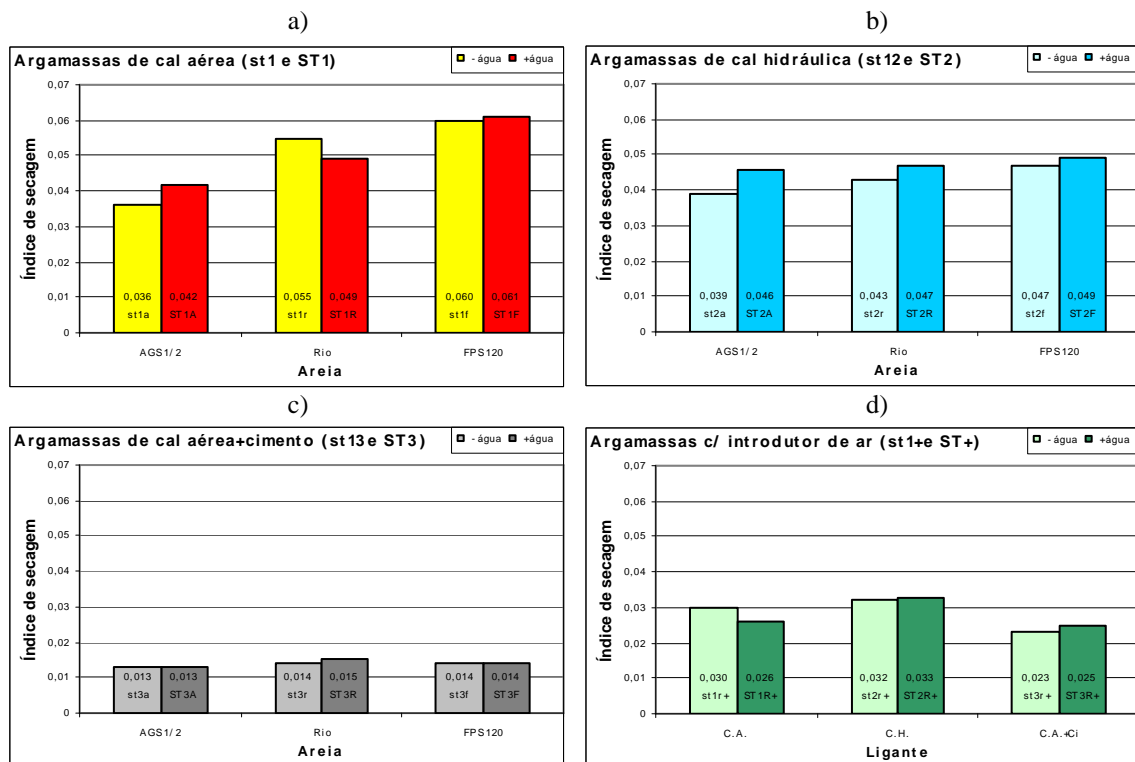


Figura 4.13. – Índices de secagem das argamassas. a) Argamassas de cal aérea; b) Argamassas de cal hidráulica; c) Argamassas de cal aérea+cimento; d) Argamassas com introdutor de ar. (C.A. – cal aérea; C.H. – cal hidráulica; C.A.+Ci – cal aérea+cimento)

A figura 4.14. mostra as curvas de secagem das argamassas, apresentando a evolução do teor de água das argamassas, em percentagem, ao longo do tempo, em horas. As curvas agrupam-se por argamassas de ligante semelhante, variando o tipo de areia e a quantidade de água e utilização ou não de introdutor de ar.

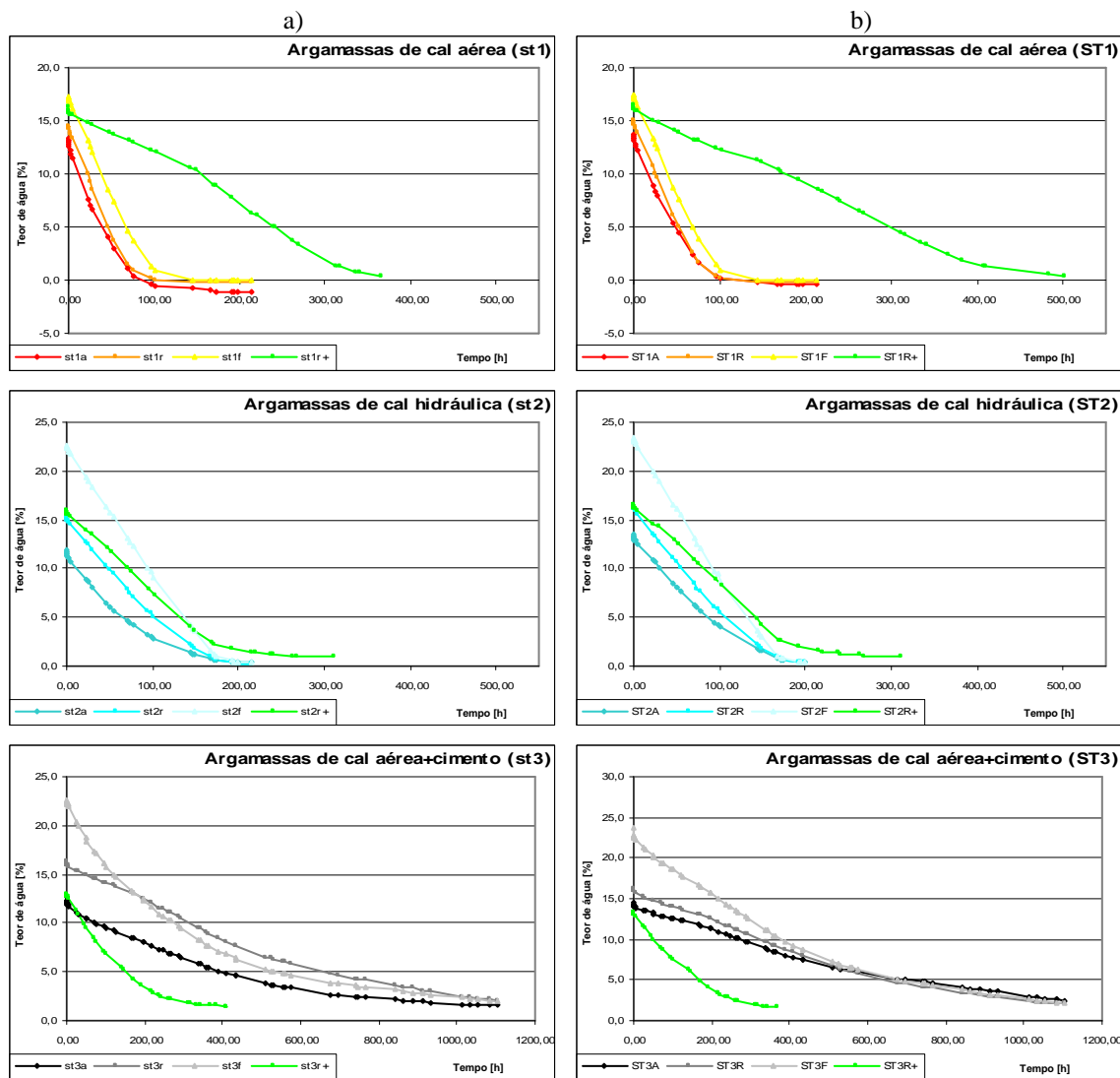


Figura 4.14. – Curvas de secagem das argamassas, em função do tempo. a) Argamassas com menor quantidade de água;

b) Argamassas com maior quantidade de água

Analisando os resultados do índice de secagem do ponto de vista da dimensão do agregado podemos concluir que, em geral, o índice de secagem das argamassas aumenta à medida que a dimensão do agregado diminui. Esta tendência é clara nas argamassas de cal aérea e de cal hidráulica, mas nas argamassas de cal aérea e cimento aquela que utilizou areia de rio revelou os valores mais elevados de índice de secagem. No entanto,

a análise das curvas da evolução da secagem destas argamassas permite observar que também se verifica a tendência referida.

Relativamente à quantidade de água utilizada, nas argamassas de cal aérea e de cal hidráulica regista-se uma tendência de aumento do índice de secagem nas argamassas com recurso a maior quantidade de água. Esta tendência é contrariada somente pela argamassa de cal aérea, com areia de rio e menor quantidade de água (st1r), que acredita-se ter sido um acaso até pelo elevado desvio padrão registado no quadro 4.8.. As argamassas que registam os maiores índices de secagem são as argamassas de cal aérea, à excepção daquelas com areia AGS 1/2. Com este tipo de areia, as argamassas de cal hidráulica registam um valor maior do índice de secagem. Os valores mais baixos de índice de secagem são obtidos pelas argamassas de cal aérea e cimento, registando valores bastante inferiores ao das argamassas de outros ligantes. Analisando as curvas de secagem das argamassas com este tipo de ligante é possível observar que o padrão de secagem é bastante diferente daquele observado para as argamassas com outros ligantes. Constata-se assim que a adição de cimento a argamassas de cal aérea reduz de forma significativa a velocidade de secagem. Estas argamassas exibiram pouca sensibilidade ao tipo de areia utilizada, bem como à diferente quantidade de água utilizada, ficando a dúvida se este tipo de comportamento é normal ou se está relacionado com os problemas de climatização que se registaram na sala.

Apresenta-se de seguida, na figura 4.15., a comparação dos resultados do índice de secagem de argamassas de constituição e quantidade de água semelhantes, com a diferença de utilização ou não de introdutor de ar.

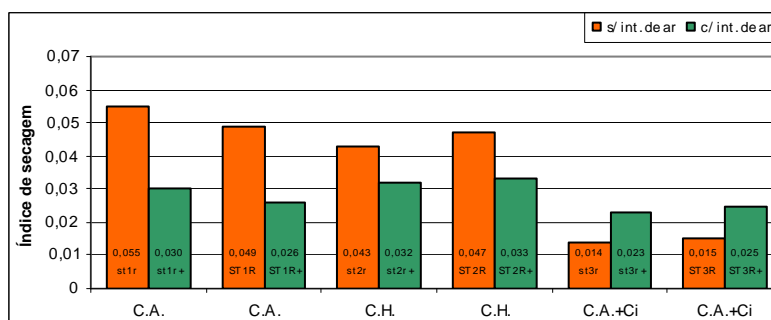


Figura 4.15. – Comparação de índices de secagem de argamassas com e sem utilização de introdutor de ar.

(C.A. – cal aérea; C.H. – cal hidráulica; C.A.+Ci – cal aérea+cimento)

A figura 4.15. mostra duas tendências diferentes. Em primeiro lugar observa-se que a utilização do introdutor de ar nas argamassas de cal aérea e de cal hidráulica originou uma diminuição do índice de secagem. Em segundo lugar, nas argamassas de cal aérea e cimento o introdutor de ar originou um aumento do índice de secagem. Relativamente às argamassas de cal aérea, analisando as curvas de secagem observa-se que a adição do introdutor de ar originou um padrão de secagem bastante distinto daquele registado na argamassa sem adjuvante. Já nas argamassas de cal aérea e cimento a alteração de padrão é precisamente a contrária, ou seja, a utilização do introdutor de ar originou uma alteração bastante significativa do padrão de secagem da argamassa reduzindo muito o tempo de secagem.

Têm de ser referidas algumas hipóteses para estes resultados. As argamassas de cal aérea e de cal hidráulica, sem utilização do introdutor de ar, foram ensaiadas em alturas diferentes daquelas com utilização deste produto. Como na altura do ensaio das argamassas com introdutor de ar se registaram problemas de controlo de condições climáticas não é possível determinar se as tendências evidenciadas pela figura são correctas, ainda que as diferenças entre valores sejam significativas. Relativamente às argamassas de cal aérea e cimento com e sem utilização do introdutor de ar, ambas foram ensaiadas nas mesmas condições e por isso assume-se a tendência evidenciada como válida.

5. Análise relacional

No capítulo anterior foram apresentados os resultados dos vários ensaios realizados às argamassas estudadas no trabalho. Com base nesses resultados foram estabelecidas tendências e relações directas entre os componentes das argamassas (tipo de ligante, tipo de areia, quantidade de água e introdutor de ar) e o comportamento das argamassas, sem fazer referência a outro tipo de causas que estivessem na origem dos resultados. No entanto, é possível relacionar os resultados de vários ensaios e através dessa relação estabelecer outro tipo de análise e conclusões.

Neste capítulo efectua-se esse tipo de relações. Procura-se estabelecer analogias entre características e propriedades que ainda não foram abordadas. A maioria das relações estabelecidas neste capítulo tem presente a porosidade, uma vez que esta característica é a principal responsável pelo comportamento geral das argamassas, a par do ligante (sendo que este não é uma característica). Relativamente ao comportamento de humedecimento e secagem, a porosidade é sem dúvida a característica mais importante de conhecer. Uma vez que este trabalho tem uma grande ênfase nestes dois aspectos, faz todo o sentido que a porosidade seja a característica abordada em maior detalhe. Abordam-se de seguida as várias análises.

5.1. Porosidade e quantidade de água das argamassas

A relação entre a quantidade de água utilizada nas argamassas e a porosidade é um tema já bastante estudado. No entanto, achou-se importante abordar esta relação para um melhor entendimento dos resultados de alguns ensaios realizados. A figura 5.1. mostra a relação entre a porosidade e a quantidade de água utilizada nas argamassas.

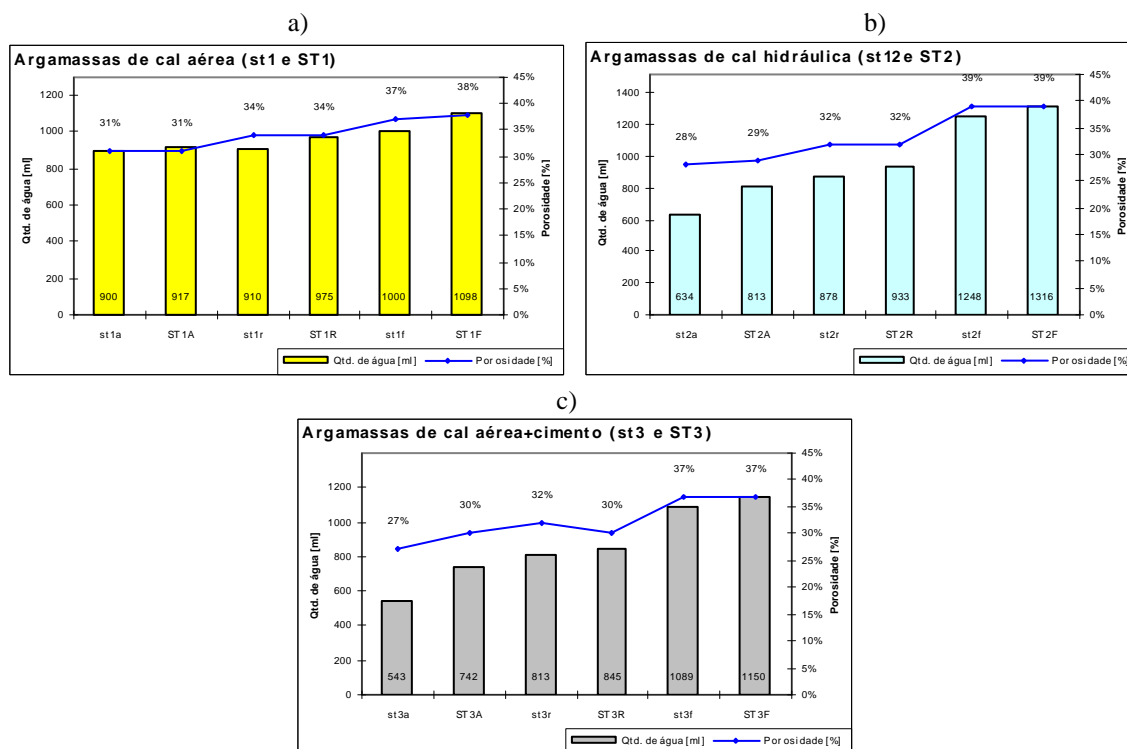


Figura 5.1. – Relação entre os valores de quantidade de água e porosidade das argamassas. a) Argamassas de cal aérea; b) Argamassas de cal hidráulica; c) Argamassas bastardas. (ordem decrescente de dimensão do agregado)

Foi já referido no capítulo 4 que a porosidade das argamassas aumenta com a diminuição da dimensão do agregado. A observação da figura 5.1., para além dessa relação, mostra também que existe uma relação entre a quantidade de água utilizada nas argamassas e a sua porosidade, tal como referido pela opinião geral e no capítulo 2. Assim, pode afirmar-se que agregados de menor dimensão necessitam de maior quantidade de água para uma determinada trabalhabilidade, devido à sua maior superfície específica. Esse aumento de água nas argamassas resulta em maiores valores de porosidade. No entanto, entre argamassas semelhantes, mas com diferente quantidade de água (por exemplo st1a e ST1A), o aumento de porosidade faz-se sentir somente em algumas argamassas, o que se pensa ser devido às pequenas dimensões dos provetes ensaiados. Pensa-se que a tendência de aumento da porosidade com o aumento da quantidade de água, quer no conjunto dos resultados, como em argamassas de constituição semelhante, seria mais acentuada se não se tivesse recorrido à operação de compactação e também com a utilização de provetes de maiores dimensões.

5.2. Porosidade e resistências mecânicas das argamassas

É referido de forma unânime que a porosidade influencia as resistências mecânicas das argamassas. Esta influência traduz-se numa redução das resistências com o aumento da porosidade. As figuras 5.2. e 5.3. relacionam os resultados da porosidade com as resistências mecânicas das argamassas do desenvolvimento experimental.

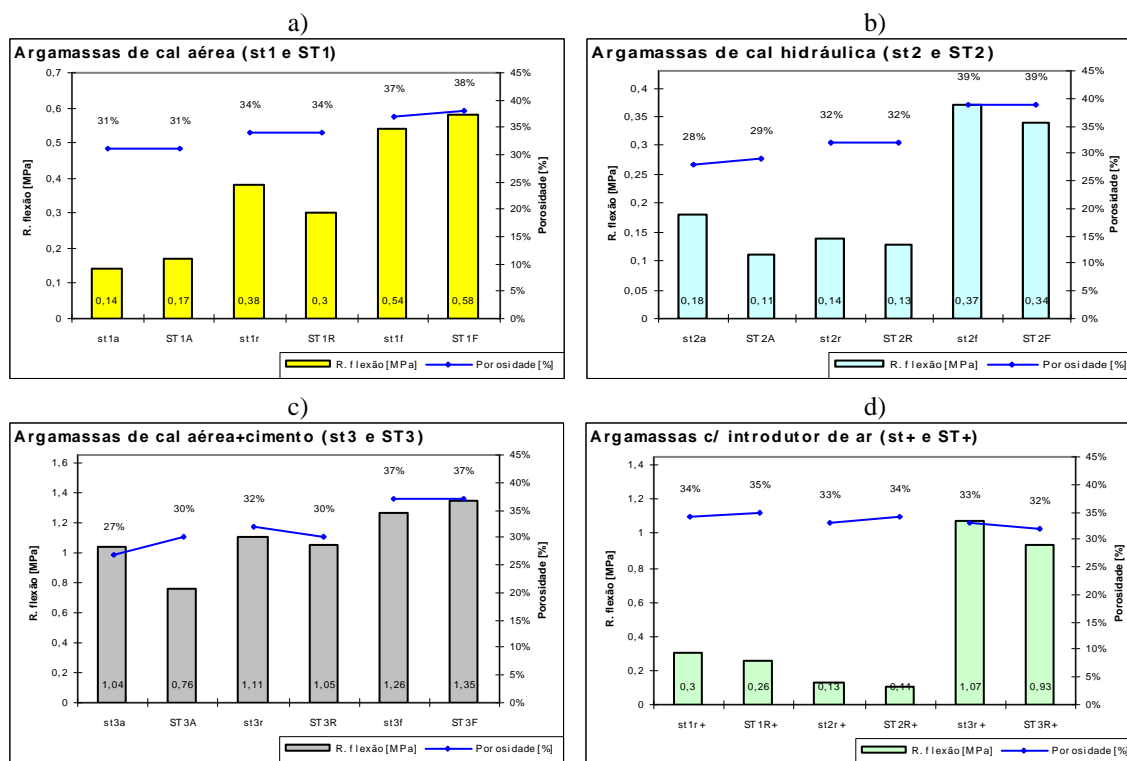


Figura 5.2. – Relação entre a porosidade e a resistência à flexão das argamassas. a) Argamassas de cal aérea; b) Argamassas de cal hidráulica; c) Argamassas de cal aérea+cimento; d) Argamassas com introdutor de ar. (ordem decrescente de dimensão do agregado)

Ao analisar a figura 5.2. a), b) e c), se se excluir alguns valores atípicos de resistência à flexão, pode perceber-se que esta resistência tende a aumentar quando as dimensões do agregado diminuem. Também a porosidade aumenta na mesma relação, ou seja, com a diminuição da dimensão do agregado. Este facto parece contrariar a opinião de que maior porosidade se traduz num abaixamento das resistências mecânicas. Na verdade esta situação acontece, mas aplica-se a argamassas de constituição semelhante, porque tal como se pode ver pelas figuras, quando se varia o tipo de agregado essa relação deixa de existir. Analisando as figuras 5.2 b), c) e d), percebe-se que, para argamassas de constituição semelhante mas com diferentes quantidades de água, a resistência à flexão tende a diminuir. Este facto suporta a ideia de que as argamassas com utilização

de maiores quantidades de água originam maior porosidade, apesar de nas figuras não ser possível concluir esse facto de forma clara, pois os valores de porosidade são muito semelhantes e só alguns confirmam esta tendência. No entanto, o abaixamento generalizado das resistências mecânicas leva a crer que o aumento da porosidade com a utilização de maior quantidade de água é uma realidade. Analisando agora a figura 5.2. a) pode observar-se que somente as argamassas com utilização de areia de rio confirmam o referido acima. No entanto, se se pensar que a carbonatação da cal das argamassas fica mais facilitada com um aumento de porosidade os resultados obtidos pelas argamassas com utilização de areia AGS 1/2 e FPS 120 são mais compreensíveis. Com base nesta ideia, assume-se como normal a obtenção de valores próximos de resistência à flexão nas argamassas de cal aérea.

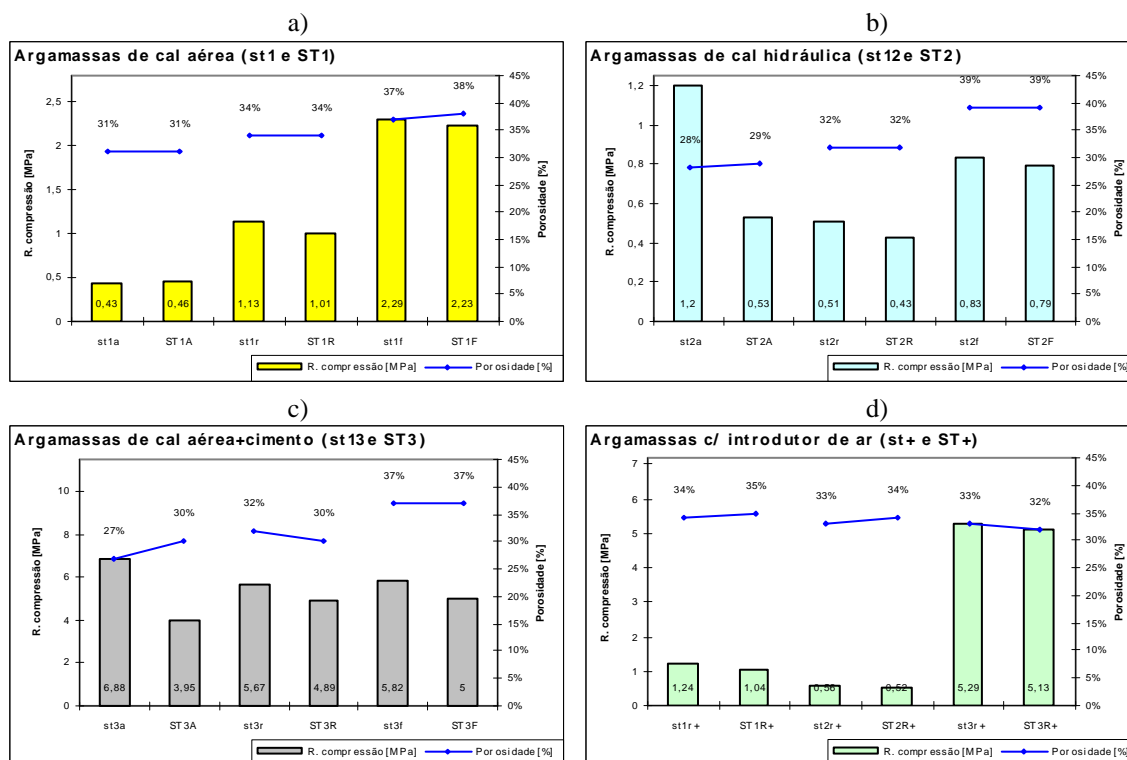


Figura 5.3. – Relação entre a porosidade e a resistência à compressão das argamassas a) Argamassas de cal aérea; b) Argamassas de cal hidráulica; c) Argamassas de cal aérea+cimento; d) Argamassas com introdutor de ar. (ordem decrescente de dimensão do agregado)

Relativamente à resistência à compressão das argamassas, a figura 5.3. a) mostra a proximidade de valores de resistência à compressão para argamassas de constituição semelhante mas diferente quantidade de água, tal como acontecia na resistência à flexão. Relativamente à relação entre a porosidade e a resistência à compressão, as tendências e suposições são semelhantes às efectuadas para a relação entre a porosidade

e a resistência à flexão. No entanto, no que diz respeito à resistência à compressão não se verifica a tendência de aumento das resistências com a diminuição da dimensão do agregado, apesar de, em geral, as argamassas com maiores resistências serem as com recurso a areia FPS 120.

A figura 5.4. apresenta a relação ente a porosidade e as resistências mecânicas de argamassas com e sem a utilização de introdutor de ar.

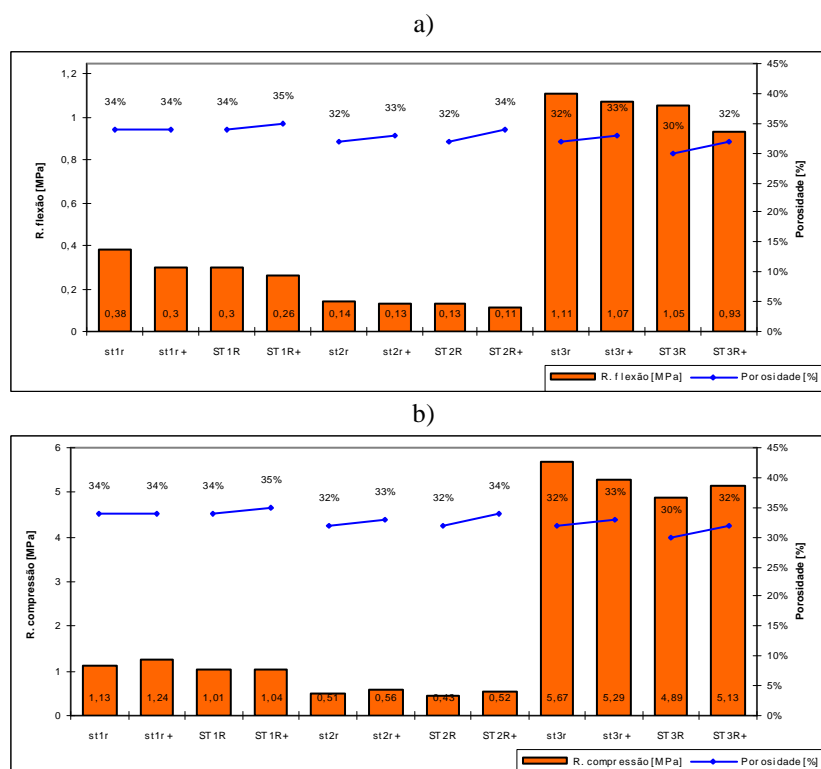


Figura 5.4. – Relação entre a porosidade e as resistências mecânicas de argamassas com e sem a utilização de introdutor de ar. a) Relação porosidade/resistência à flexão; b) Relação porosidade/resistência à compressão.

Relativamente à utilização de introdutores de ar na realização de argamassas, a opinião geral refere que o aumento da porosidade que advém da utilização destes produtos resulta num abaixamento das resistências mecânicas. Analisando a figura 5.4. a) esta relação constata-se e é notória a relação do abaixamento das resistências mecânicas com o aumento da porosidade. No entanto, analisando a figura 5.4. b), o mesmo não se verifica em relação à resistência à compressão. Aliás, verifica-se precisamente a relação contrária, com excepção para a argamassa de cal aérea e cimento com menor quantidade de água. Assim e contrariamente ao esperado, estabelece-se a relação de que o aumento de porosidade resultante da utilização do introdutor de ar origina um aumento da

resistência à compressão. Apesar de se verificar esta tendência, não parece credível que esta situação seja normal, até porque os valores de resistência à compressão não acompanham a tendência dos valores de resistência à flexão, quando normalmente estes valores apresentam o mesmo tipo de tendência.

5.3. Porosidade e absorção de água por capilaridade das argamassas

A relação entre a porosidade e a absorção de água por capilaridade foi abordada no capítulo 2 deste trabalho e é também um assunto bastante investigado. A opinião geral é de que o aumento de porosidade das argamassas resulta em velocidades mais elevadas de absorção de água por capilaridade, bem como maiores valores absolutos de absorção de água. Para além da quantidade de poros, é referida também a importância das suas dimensões, sendo que alguns autores referem que, numa fase inicial, a velocidade de absorção é tanto maior quanto maiores forem as dimensões dos poros.

As figuras 5.5. e 5.6. relacionam a porosidade das argamassas com os coeficientes de absorção de água por capilaridade e o valor assintótico de absorção, respectivamente.

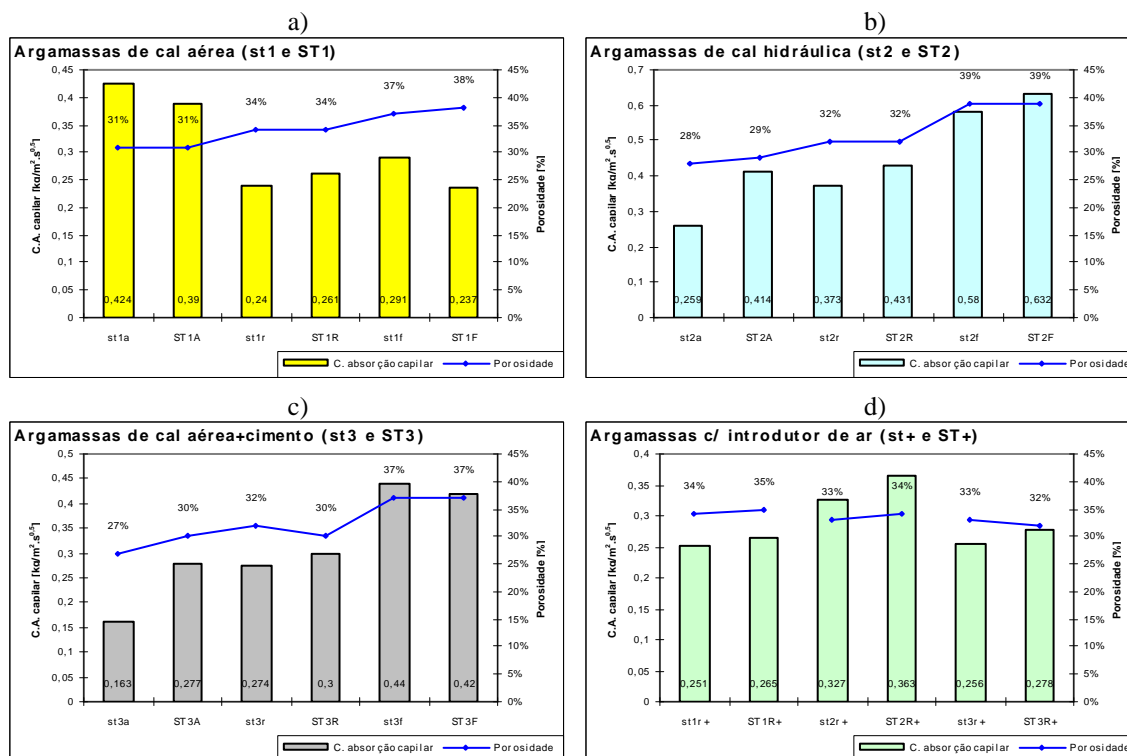


Figura 5.5. – Relação entre a porosidade e o coeficiente de absorção de água por capilaridade das argamassas. a) Argamassas de cal aérea; b) Argamassas de cal hidráulica; c) Argamassas de cal aérea+cimento; d) Argamassas com introdutor de ar. (ordem decrescente de dimensão do agregado)

A observação da figura 5.5. permite o estabelecimento de dois tipos de relações distintas, uma associada às argamassas com ligante aéreo e outra associada às argamassas de ligantes hidráulicos. Começando pelas argamassas de cal aérea, parece observar-se a tendência para uma diminuição do coeficiente de absorção de água por capilaridade com o aumento da porosidade das argamassas, ou pelo menos, no que diz respeito à passagem das argamassas com utilização de areia AGS 1/2 para as areias mais finas. Nota-se ainda, relativamente às argamassas com utilização de areia AGS 1/2 e FPS 120, que um aumento da água de amassadura tende a diminuir o mesmo coeficiente. Se se comparar estes resultados com a opinião geral encontramos uma contradição, ou seja, o aumento da porosidade não origina um aumento do coeficiente de absorção capilar. No entanto, pensa-se que esta situação pode encontrar explicação no facto das argamassas de cal aérea endurecerem por carbonatação. O processo de carbonatação das argamassas de cal aérea desenvolve-se pela reacção do ligante com o CO_2 do ar. Torna-se óbvio que nas argamassas mais porosas o contacto entre os dois elementos fica facilitado. Sabe-se também que a carbonatação origina a formação de cristais que ocupam os poros das argamassas, contribuindo para a sua obstrução. Desta forma e avaliando os resultados sob este ponto de vista, é possível que a diminuição do

coeficiente de absorção de água por capilaridade com o aumento da porosidade seja devido a uma carbonatação mais desenvolvida nessas argamassas.

Analisando agora as argamassas de cal hidráulica e de cimento, constata-se que existe uma tendência para o aumento do coeficiente de absorção de água por capilaridade com o aumento da porosidade, estando de acordo com a opinião geral. Mais ainda, as figuras 5.5. b), c) e d) mostram que para argamassas de constituição semelhante, mas com quantidade de água diferente, se regista um aumento do coeficiente com o aumento da quantidade de água. Este resultado é importante para confirmar a suposição, feita no ponto 5.2., de que efectivamente se regista um aumento da porosidade com o aumento da quantidade de água, seja para argamassas com diferentes tipos de agregado, seja para argamassas de constituição semelhante mas diferentes quantidades de água, apesar dos resultados obtidos não o indicarem de forma clara. De acordo com a opinião geral, pensa-se que o aumento do coeficiente de absorção de água por capilaridade em argamassas com maior quantidade de água está, em parte, relacionado com um aumento das dimensões dos poros.

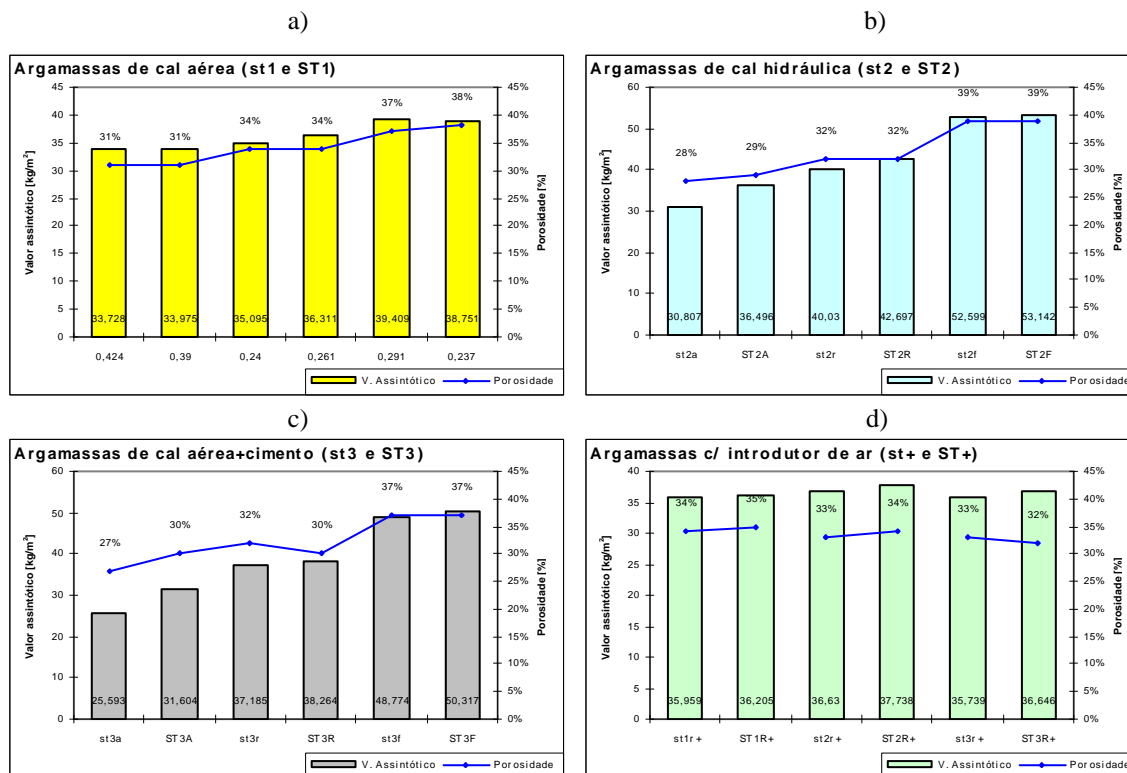


Figura 5.6. – Relação entre a porosidade e o valor assintótico de absorção de água por capilaridade. a) Argamassas de cal aérea; b) Argamassas de cal hidráulica; c) Argamassas de cal aérea+cimento; d) Argamassas com introdutor de ar. (ordem decrescente de dimensão do agregado)

O valor assintótico de absorção de água por capilaridade evidencia uma tendência para aumentar com o aumento da porosidade, quer numa perspectiva geral, como também entre argamassas semelhantes com diferente quantidade de água. A observação da figura 5.6. não deixa dúvida de que as argamassas mais porosas acumulam maior quantidade de água no seu interior, correspondendo o máximo às argamassas com utilização de areia FPS 120. É importante referir que a tendência para o aumento do valor assintótico de absorção de água por capilaridade em argamassas iguais com maior quantidade de água evidencia um aumento da porosidade e/ou porometria, que os valores de porosidade não reflectem.

A figura 5.7. relaciona a porosidade com o coeficiente de absorção de água por capilaridade e o valor assintótico de absorção, efectuando a comparação entre argamassas de constituição e quantidade de água semelhante, mas com a diferença de utilização ou não de introdutor de ar.

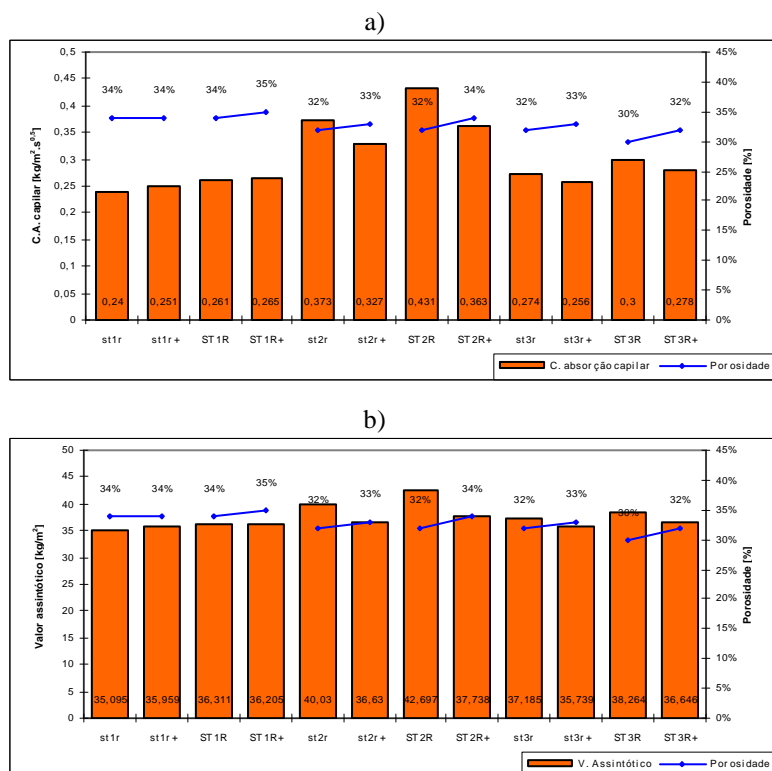


Figura 5.7. – Relação entre a porosidade e características de absorção de água por capilaridade em argamassas com e sem utilização de introdutor de ar. a) Relação entre porosidade e coeficiente de absorção de água por capilaridade; b) Relação entre a porosidade e o valor assintótico de absorção de água por capilaridade.

A análise do efeito da utilização do introdutor de ar pode separar-se em dois grupos: as argamassas de ligante aéreo e as argamassas de ligantes hidráulicos. Assim, nas argamassas de cal aérea a utilização do introdutor de ar parece não produzir os efeitos normalmente referidos para este produto. Relativamente ao coeficiente de absorção de água por capilaridade, o aumento de porosidade das argamassas parece resultar num incremento ligeiro do coeficiente. No que diz respeito ao valor assintótico de absorção, regista-se, praticamente, uma manutenção dos valores, apesar do aumento da porosidade. Estes resultados parecem indicar que, nestes aspectos, o introdutor não produz um efeito evidente nas argamassas de cal aérea. No entanto, em termos de durabilidade, o aumento da porosidade das argamassas pode revelar-se benéfico, por exemplo, em relação à resistência a ciclos de gelo/degelo.

Relativamente às argamassas com ligantes hidráulicos, regista-se a tendência para o abaixamento do coeficiente de absorção de água por capilaridade, bem como o abaixamento do valor assintótico de absorção, com o aumento de porosidade provocado pela utilização de introdutor de ar. Este resultado parece ir contra a opinião de que o aumento da porosidade faz aumentar tanto o índice como o valor assintótico de absorção de água por capilaridade. No entanto, este era um resultado esperado, pois tanto a ficha técnica do produto, como as conclusões de alguns autores, evidenciam este tipo de comportamento nas argamassas com utilização destes produtos. Este facto prende-se com o tipo de porosidade que a sua utilização origina. Prende-se, sobretudo, com o aparecimento de poros de grandes dimensões, e do tipo bolha, que não favorecem a absorção de água por capilaridade, ao contrário dos poros capilares. Este aspecto é relevante do ponto de vista de durabilidade, pois para além de diminuir a absorção de água por via da capilaridade, é também muito importante na melhoria da resistência das argamassas às tensões associadas a ciclos de gelo/degelo, pois existe mais espaço para suportar o aumento de volume associado à formação do gelo.

5.4. Porosidade e permeabilidade ao vapor de água das argamassas

A permeabilidade ao vapor de água das argamassas é um dado importante do ponto de vista das características de secagem, pois é considerado como um indicador da capacidade de transporte de água e vapor de água. A permeabilidade ao vapor de água

das argamassas é normalmente relacionada com a porosidade, sendo que é habitualmente referido que variam de forma directa, ou seja, um aumento da porosidade traduz-se num aumento da permeabilidade.

A figura 5.8. representa a relação entre a porosidade e a permeabilidade das argamassas. Os resultados apresentam-se agrupados por tipo de ligante utilizado, à excepção das argamassas com utilização de introdutor de ar, cujos resultados são agrupados conjuntamente no mesmo gráfico.

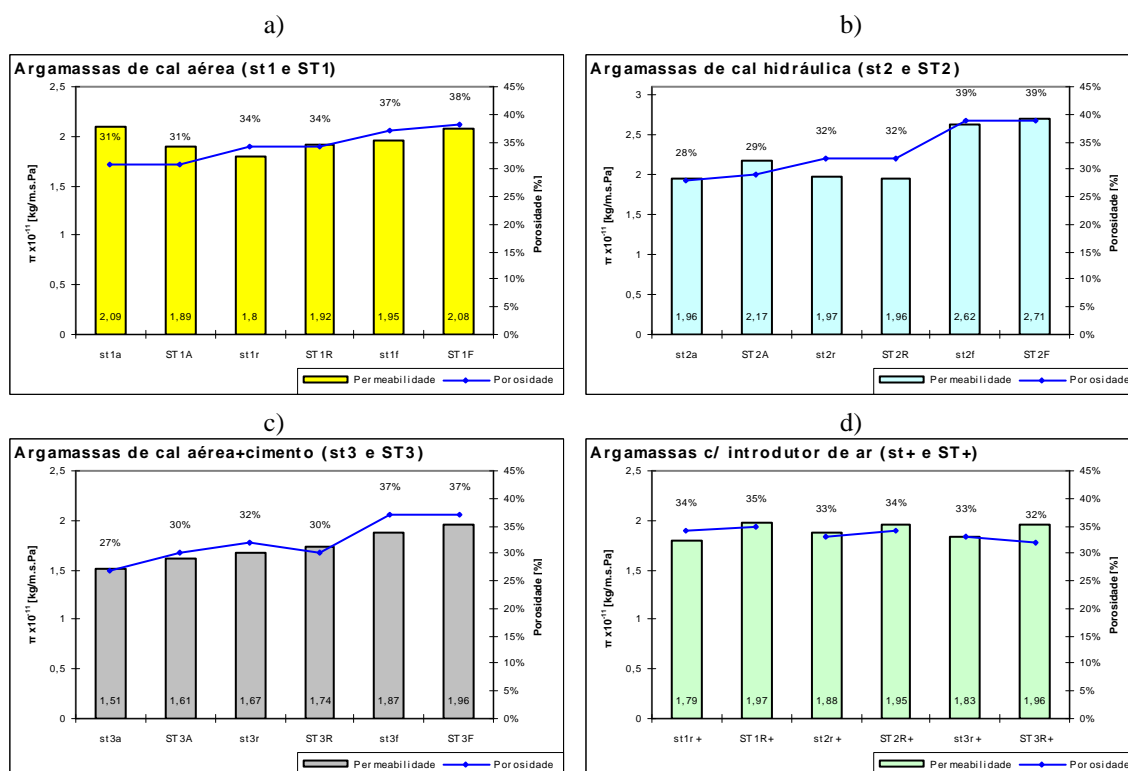


Figura 5.8. – Relação entre a porosidade e a permeabilidade ao vapor de água das argamassas. a) Argamassas de cal aérea; b) Argamassas de cal hidráulica; c) Argamassas de cal aérea+cimento; d) Argamassas com introdutor de ar. (ordem decrescente de dimensão do agregado, π – permeabilidade)

Os resultados da figura 5.5. deixam bem clara a relação entre a porosidade das argamassas e a permeabilidade ao vapor de água. Se for tido em conta que as argamassas de cal hidráulica com recurso a areia AGS 1/2 e areia FPS 120 registaram problemas durante o ensaio, o que se acredita ter feito aumentar os valores de permeabilidade, então os resultados ganham outra dimensão. Com este reparo, percebe-se claramente a tendência, com excepção de alguns resultados esporádicos. Nota-se ainda que o aumento de água em argamassas semelhantes origina um aumento da permeabilidade, suportando a ideia de um aumento de porosidade com o aumento da

quantidade de água e também uma melhor conexão entre os diversos poros. Em termos gerais, as argamassas de cal aérea e cimento apresentam os menores valores de permeabilidade. As argamassas de cal aérea e cimento exibem também, em geral, os valores mais baixos de porosidade, o que mais uma vez confirma a relação.

A figura 5.9. apresenta a comparação entre argamassas de constituição e quantidade de água semelhante, mas com a diferença de utilização ou não de introdutor de ar, no que diz respeito à relação entre a porosidade e a permeabilidade ao vapor de água.

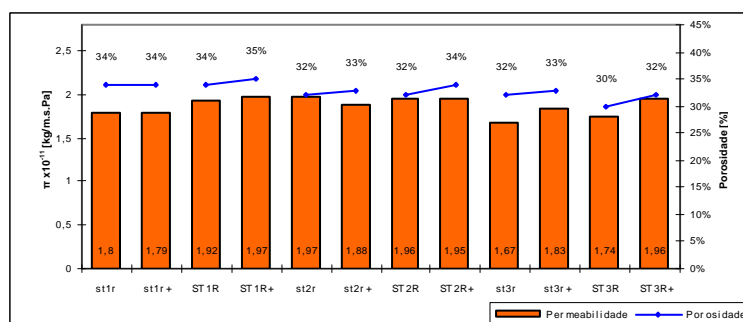


Figura 5.9. – Relação entre a porosidade e a permeabilidade ao vapor de água em argamassas com e sem a utilização de introdutor de ar. (π – permeabilidade)

A análise dos resultados referentes às argamassas com e sem utilização de introdutor de ar não é intuitiva. Começando por analisar os resultados referentes às argamassas de cal aérea, o aumento de porosidade originado pela utilização do introdutor parece não alterar de forma evidente o comportamento das argamassas. Nas argamassas com menor quantidade de água, os valores de permeabilidade parecem não sofrer alterações e nas argamassas com maior quantidade de água o valor de permeabilidade sobe ligeiramente com a utilização do introdutor de ar. De qualquer das formas, de forma isolada, não é possível fazer considerações sobre o seu efeito.

Relativamente às argamassas de cal hidráulica, os resultados mostram que o valor de permeabilidade diminui com o aumento de porosidade provocado pela utilização do introdutor de ar. No entanto, não é possível aceitar de forma clara os resultados obtidos. Por um lado, os resultados vão ao encontro das conclusões obtidas por alguns autores, de que a utilização do introdutor de ar produz este tipo de efeito, alegadamente pelo menor grau de conexão entre os poros. Por outro lado, foi referido que as argamassas de cal hidráulica registaram problemas no decorrer do ensaio de permeabilidade e, apesar de nos provetes com areia de rio não se ter observado problemas, não é possível

concluir que estes não tenham sido afectados, aumentando o valor da permeabilidade. De qualquer das formas, e não possuindo outros termos de comparação, assume-se os resultados como válidos.

Relativamente às argamassas de cal aérea e cimento, os resultados são claros. O aumento de porosidade provocado pela utilização do introdutor de ar origina um aumento da permeabilidade destas argamassas.

Assim, efectuando considerações gerais com base nos resultados registados, e deixando à margem as argamassas de cal hidráulica, parece haver uma certa tendência para o aumento da permeabilidade ao vapor de água das argamassas, com o aumento da porosidade originada pela utilização do introdutor de ar. No entanto, é explícito que esta tendência não é de todo clara, baseando-se mais em convicções e resultados referidos por outros autores. Questiona-se ainda a natureza do produto introdutor de ar, pois este parece fazer sempre um efeito mais evidente nas argamassas com utilização de cimento.

5.5. Porosidade e secagem das argamassas

As informações referentes a este tipo de relação em argamassas são escassas e muitas vezes não passam de meras suposições, quase sempre baseadas em resultados de permeabilidade e porosidade. Ainda que essas relações e suposições façam sentido, existe uma falta de resultados práticos que comprovem essas teorias. Com base nos ensaios realizados neste trabalho de investigação é possível estabelecer relações suportadas por resultados práticos, contribuindo para o aumento de informação acerca do tema.

A figura 5.10. relaciona a porosidade e a secagem das argamassas. Os resultados estão agrupados por argamassas de ligante semelhante, à excepção das argamassas com utilização de introdutor de ar, cujos resultados se agrupam num único gráfico.

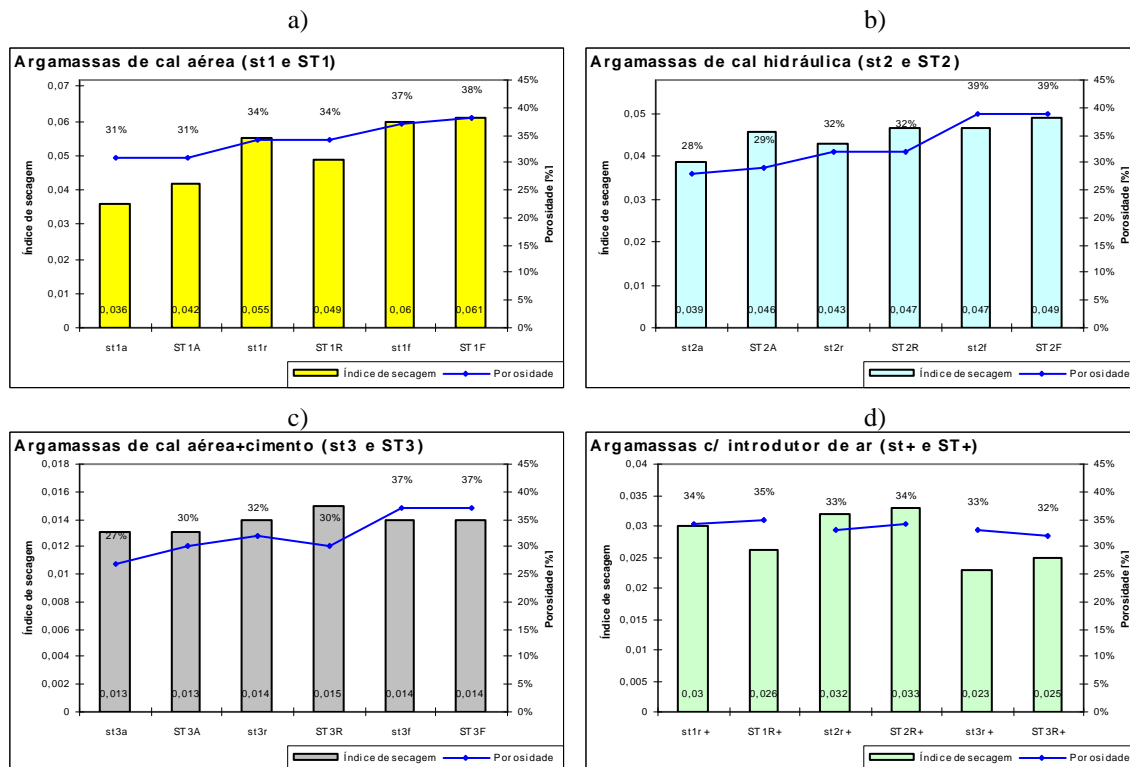


Figura 5.10. – Relação entre a porosidade e o índice de secagem das argamassas. a) Argamassas de cal aérea; b) Argamassas de cal hidráulica; c) Argamassas de cal aérea+cimento; d) Argamassas com introdutor de ar. (ordem decrescente de dimensão do agregado)

A figura 5.10. mostra uma tendência generalizada de aumento do índice de secagem das argamassas com o aumento da porosidade (NOTA: atenção à diferença de escala do índice de secagem, por vezes significativa, entre os diferentes gráficos da figura 5.10.). As argamassas com maiores índices de secagem são as argamassas de cal aérea, excepto nas argamassas executadas com areia AGS 1/2, o que confirma a opinião generalizada. Esta tendência encontra excepção em alguns valores de índices de secagem um pouco atípicos, que se crêem fortuitos. No entanto, nas argamassas de cal aérea e cimento a tendência de aumento do índice de secagem não se verifica para as argamassas com utilização de areia FPS 120, que apesar de registarem os valores mais elevados de porosidade, não obtêm valores de índice de secagem mais elevados que os apresentados pelas argamassas com utilização de areia de rio. Os valores bastante próximos do índice de secagem nas argamassas de cal aérea e cimento podem estar relacionados com os problemas registados durante o ensaio de secagem destas argamassas, relativos ao dispositivo de climatização. Por outro lado, estes valores podem estar também relacionados com as dimensões dos poros destas argamassas, que são mais reduzidos.

Regista-se também um aumento do índice de secagem em argamassas de constituição semelhante mas com utilização de maior quantidade de água, o que mais uma vez volta a sugerir o aumento de porosidade nestas argamassas. Para além disso, o aumento de água nas argamassas pode originar uma melhor conexão entre os diversos poros, aumentando assim a velocidade de secagem.

Apresenta-se de seguida, na figura 5.11., a comparação entre argamassas de constituição e quantidade de água semelhante, com a diferença de utilização ou não de introdutor de ar, relativamente à influência da porosidade originada na velocidade de secagem das argamassas.

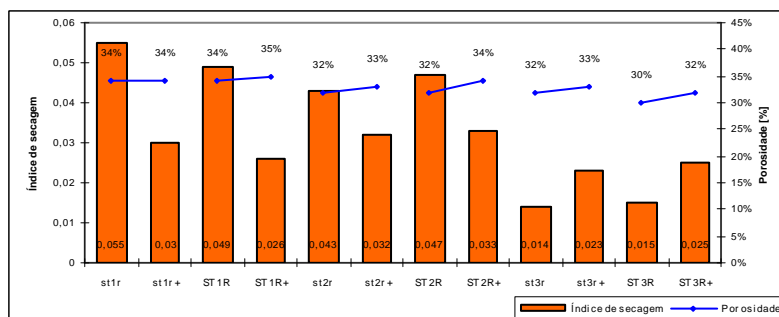


Figura 5.11. – Relação entre a porosidade e o índice de secagem, em argamassas com e sem utilização de introdutor de ar

Os resultados evidenciados pela figura 5.11. podem ser analisados em separado, em função dos tipos de ligante. Assim, para as argamassas de cal aérea e de cal hidráulica, a utilização do introdutor de ar e o aumento de porosidade daí decorrente originaram um abaixamento notório dos valores do índice de secagem das argamassas. Já nas argamassas de cal aérea e cimento, a utilização deste produto e o aumento de porosidade associado resultaram num aumento notório do índice de secagem. Há claramente um comportamento diferente relativamente às argamassas de cal e nas argamassas com adição de cimento. Os problemas registados durante o ensaio de secagem não permitem tirar conclusões totalmente fidedignas dos resultados, no entanto, os resultados evidenciam diferenças muito grandes de comportamento e tendências bem marcadas. Estes resultados parecem indicar um comportamento distinto do introdutor de ar em presença de cal, ou de cimento.

5.6. Permeabilidade e secagem das argamassas

Através da realização do ensaio de permeabilidade ao vapor de água e também do ensaio de secagem podem relacionar-se os resultados obtidos nos 2 ensaios, e tirar conclusões da sua ligação.

A figura 5.12. mostra a relação entre as duas propriedades para as várias argamassas. Os resultados agrupam-se em argamassas de ligante semelhante, excepto no caso de argamassas com utilização de introdutor de ar, onde os resultados são agrupados conjuntamente no mesmo gráfico.

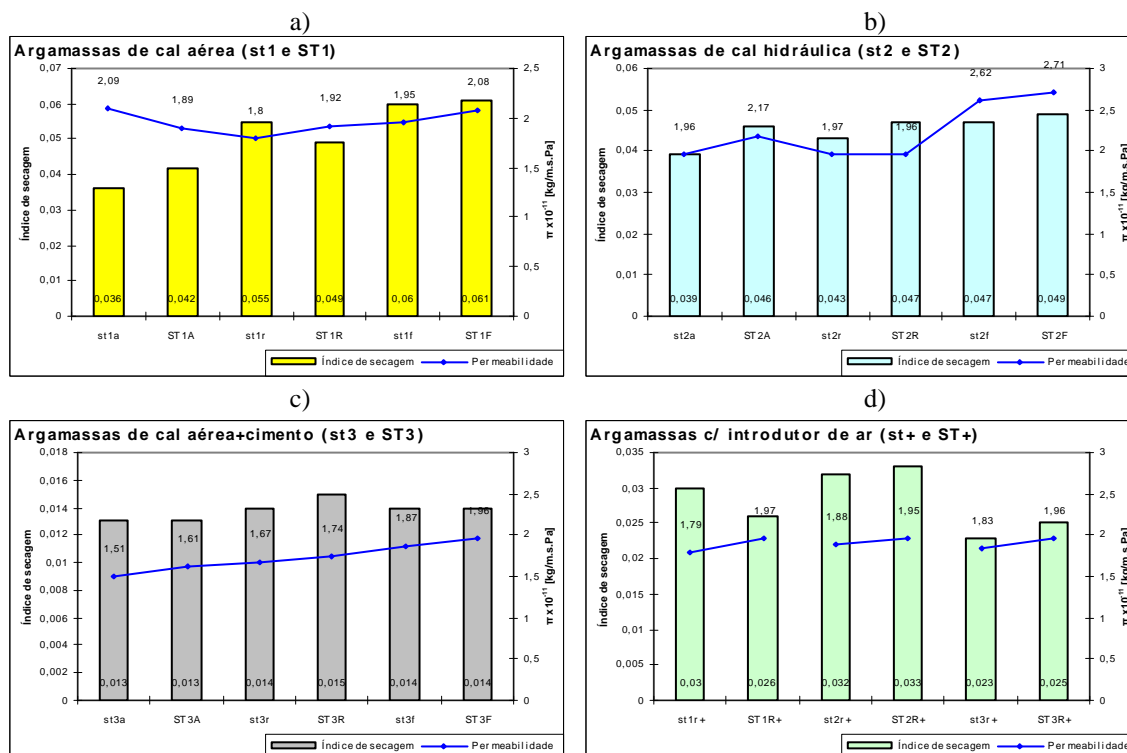


Figura 5.12. – Relação entre a permeabilidade ao vapor de água e o índice de secagem das argamassas. a) Argamassas de cal aérea; b) Argamassas de cal hidráulica; c) Argamassas de cal aérea+cimento; d) Argamassa com introdutor de ar. (ordem decrescente de dimensão do ligante)

Antes de se começar a análise da figura, há que realçar que tanto no ensaio de permeabilidade ao vapor de água, como no ensaio de secagem, se registaram algumas dificuldades. Por esta razão, a relação entre os vários dados da figura pode não ser a melhor e certamente que foi afectada. No entanto, pensa-se que é possível estabelecer tendências.

Começando por analisar as argamassas de cal aérea, parece não haver uma relação entre as duas propriedades. No entanto, os valores de permeabilidade alcançados pelas argamassas com recurso a areia AGS 1/2 revelam valores anormalmente elevados de permeabilidade ao vapor de água, maiores até do que os valores exibidos pelas argamassas com recurso a areia FPS 120, que são as argamassas mais porosas. De facto, estas argamassas foram as que forneceram valores do ensaio de permeabilidade mais atípicos, como se pode observar pelas figuras 5.2. a) e d). Assume-se portanto que esses valores não correspondem a uma situação normal, pois nesse caso a permeabilidade das argamassas com recurso a areia AGS 1/2 seguiria a tendência evidenciada pelas argamassas com recurso a areia de rio e a areia FPS 120. Por isso, pensa-se que em circunstâncias normais, a relação entre a permeabilidade ao vapor de água e o índice de secagem seja uma relação praticamente directa, com o índice de secagem a aumentar com o aumento da permeabilidade.

Relativamente às argamassas de cal hidráulica, e com excepção do valor do índice de secagem da argamassa com areia de rio e maior quantidade de água (ST2R), pode assumir-se que a permeabilidade das argamassas varia na razão aproximadamente directa do índice de secagem.

A mesma conclusão pode ser feita em relação às argamassas de cal aérea e cimento, sendo que a permeabilidade aumenta de forma suave à medida que a dimensão do agregado diminui (e a porosidade aumenta), acontecendo o mesmo para o valor do índice de secagem das argamassas.

Analisando a figura 5.12. d) conclui-se que o aumento da quantidade de água, em argamassas semelhantes, aumenta a permeabilidade e também o índice de secagem. Pensa-se que esta situação está directamente ligada com um aumento da porosidade resultante da utilização de maior quantidade de água. As excepções a estes resultados são as argamassas de cal aérea.

A figura 5.13. evidencia a relação entre a permeabilidade e o índice de secagem em argamassas de constituição e quantidade de água semelhantes, mas com a diferença de utilização ou não de introdutor de ar.

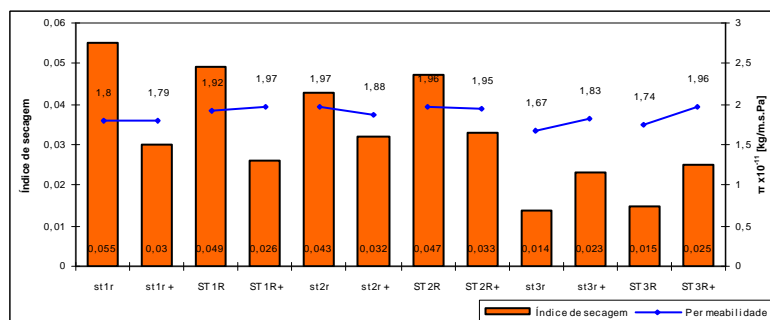


Figura 5.13. – Relação entre a permeabilidade e o índice de secagem em argamassas com e sem utilização de introdutor de ar.

Apesar das dificuldades sentidas nos ensaios referentes a cada uma das propriedades, observa-se uma boa relação entre as duas propriedades, sendo que esta correlação contribui para validar os resultados de cada um dos ensaios. À exceção de um resultado, constata-se que a utilização do introdutor de ar nas argamassas produz 2 efeitos distintos. Assim, nas argamassas de cal constata-se que a utilização do introdutor de ar origina um abaixamento dos valores de permeabilidade e especialmente do índice de secagem das argamassas, mas nas argamassas com utilização de cimento observa-se a tendência exactamente contrária. Estes resultados levam a crer que esta diferença de comportamento se deve à utilização ou não de cimento nas argamassas.

Importa referir que mais importante do que os resultados em si é relação que realmente parece existir entre a permeabilidade das argamassas e a sua velocidade de secagem.

6. Conclusões

Este trabalho, na sua componente experimental, envolveu a execução de argamassas com vários tipos de ligante, várias quantidades de água, vários tipos de areia, a utilização de um introdutor de ar e a realização de variados ensaios. Toda esta realização experimental permitiu obter uma série de resultados sobre características, propriedades e desempenho das argamassas, com alguma dimensão.

Uma abordagem do conhecimento científico desenvolvido e publicado permitiu de antemão estabelecer e focar a atenção em determinados aspectos e características das argamassas que controlam a maior parte do seu comportamento. Ainda antes do tratamento dos dados relativos ao desenvolvimento experimental, ficou patente que há pelo menos três parâmetros fundamentais no comportamento das argamassas: o tipo de ligante, a porosidade e as dimensões do agregado. O desenvolvimento experimental veio confirmar exactamente o mesmo.

O objectivo deste trabalho é analisar características de humedecimento e secagem de argamassas. Este tema está intimamente ligado a questões de durabilidade das argamassas e é nessa perspectiva que importa salientar as conclusões obtidas neste trabalho. De seguida, abordam-se as diversas variáveis presentes no desenvolvimento experimental e de que maneira é que essas variáveis optimizam ou não o humedecimento e secagem das argamassas e contribuem para a sua durabilidade.

No que diz respeito à durabilidade, as resistências mecânicas das argamassas desempenham um papel fundamental, sendo um aspecto quase incontornável. É impossível referir as resistências mecânicas das argamassas sem abordar os ligantes, pois são estes que influenciam em maior escala as resistências mecânicas e garantem a integridade das argamassas. Relativamente às resistências mecânicas das argamassas, a utilização de cal aérea como ligante mostrou dotar as argamassas de resistências mecânicas baixas, como é aliás amplamente conhecido, conduzindo a uma elevada deformabilidade. A utilização de cal hidráulica mostrou originar argamassas com resistências mecânicas ainda mais baixas que aquelas obtidas pela utilização de cal aérea, sendo que o traço mais fraco contribuiu bastante para esta situação. As maiores

resistências mecânicas foram obtidas pelas argamassas às quais foi adicionado cimento, obtendo valores francamente superiores de resistências mecânicas. A razão de uma abordagem tão alongada a um aspecto que não é do âmbito da principal investigação deste trabalho, prende-se com este aspecto estar ligado a um tipo de mecanismo de degradação que está directamente relacionado com o humedecimento e secagem das argamassas, que são os ciclos de gelo/degelo. Para resistir a este tipo de mecanismo de degradação as resistências mecânicas das argamassas indicam ser o aspecto mais importante, sendo que naturalmente, entre as várias argamassas realizadas, as de cal aérea e cimento certamente exibem o melhor comportamento.

A característica das argamassas que controla o humedecimento e a secagem, entre outros factores, é a porosidade. Nos resultados obtidos através dos vários ensaios realizados foi possível estabelecer os parâmetros que influenciam a porosidade das argamassas e consequentemente as suas características de humedecimento e secagem. A dimensão do agregado mostrou influenciar de forma significativa os valores de porosidade das argamassas. Assim, a diminuição da dimensão revelou originar um aumento da porosidade das argamassas. Este facto prende-se, sobretudo, pela maior quantidade de água que os agregados mais finos necessitam para garantir trabalhabilidade. Pode concluir-se que existe uma relação do tipo:

Menor dimensão do agregado → Maior quantidade de água → Mais porosidade

No que se refere à absorção de água por capilaridade, as argamassas de ligante aéreo mostraram comportar-se de maneira diferente das argamassas de ligantes hidráulicos. Assim, no ligante aéreo a utilização de agregados de menores dimensões (e consequente relação evidenciada acima) origina uma menor velocidade de absorção de água por capilaridade. Nas argamassas com ligantes hidráulicos, a utilização de agregados de menores dimensões (e consequente relação com mais água e maior porosidade) origina um aumento da velocidade de absorção de água por capilaridade. De entre as argamassas de cal hidráulica e as argamassas de cal aérea e cimento, as primeiras obtiveram maiores valores de coeficiente de absorção de água por capilaridade, sendo que uma optimização neste capítulo, entre os dois tipos de ligante, passa pela utilização de ligantes bastardos. Obviamente, o comportamento depende das proporções de ligantes e de areia.

O valor assintótico de absorção de água por capilaridade aumenta com a diminuição da dimensão do agregado das argamassas. Esta situação verifica-se para a totalidade das argamassas. No conjunto dos resultados, obteve-se que as argamassas de cal aérea apresentaram valores assintóticos globais mais pequenos, seguidas das argamassas de cal aérea e cimento e das argamassas de cal hidráulica.

A utilização de agregados de dimensões mais pequenas (e consequentemente, maior quantidade de água e maior porosidade) revelou uma tendência para o aumento da permeabilidade ao vapor de água da totalidade das argamassas. As argamassas de cal aérea e cimento revelaram os valores mais baixos de permeabilidade de entre a totalidade das argamassas. As argamassas de cal aérea apresentaram valores de permeabilidade superiores aos das argamassas bastardas (argamassas de cal aérea e cimento), sem grande variação nos valores de permeabilidade com a variação das dimensões do agregado. As argamassas de cal hidráulica revelaram os valores mais elevados de permeabilidade ao vapor de água.

No que diz respeito à secagem, concluiu-se que a utilização de agregado de menores dimensões (e consequente maior quantidade de água e porosidade), origina maiores valores de índice de secagem, para o conjunto das argamassas. Em termos globais, as argamassas de cal aérea apresentaram os maiores índices de secagem, com excepção para as argamassas com utilização de areia AGS 1/2, seguidas das argamassas de cal hidráulica. As argamassas de cal aérea e cimento revelaram índices de secagem bastante inferiores às outras argamassas.

Finalmente, importa referir o papel do introdutor de ar nas argamassas. Em primeiro lugar, a utilização do introdutor permitiu aumentar a porosidade das argamassas como seria de esperar, pois é a principal função deste tipo de produtos.

No que diz respeito às resistências mecânicas, a utilização do introdutor de ar originou uma redução da resistência à flexão da totalidade das argamassas. Surpreendentemente, relativamente à resistência à compressão, a utilização deste produto originou um incremento da resistência da generalidade das argamassas.

Em relação à capilaridade, a utilização do introdutor de ar permitiu reduzir o coeficiente de absorção de água por capilaridade das argamassas de cal hidráulica e das argamassas de cal aérea e cimento. Relativamente às argamassas de cal aérea, o seu uso parece não ter surtido efeito, não baixando o valor do coeficiente. Relativamente ao valor assintótico de absorção de água por capilaridade, o uso do introdutor de ar revelou reduzir, na generalidade, o valor assintótico de absorção das argamassas, mas em especial das de ligantes hidráulicos. Parece óbvio que uma optimização do humedecimento das argamassas passa pela utilização deste tipo de produtos.

No que se refere à permeabilidade ao vapor de água, o seu uso não revelou efeitos significativos nas argamassas de cal aérea e nas argamassas de cal hidráulica. No entanto, nas argamassas de cal aérea e cimento a utilização do introdutor de ar permitiu um aumento da permeabilidade.

Relativamente ao índice de secagem das argamassas, a utilização do introdutor de ar revelou diminuir significativamente o índice de secagem das argamassas de cal aérea e nas de cal hidráulica, sendo que nas argamassas de cal aérea e cimento o seu uso resultou num aumento significativo do índice de secagem. Desta forma, parece que pelo menos relativamente a argamassas com utilização de cimento, uma optimização das características de secagem passa pela utilização de introdutores de ar.

Neste trabalho estabeleceu-se ainda uma relação entre a permeabilidade ao vapor de água das argamassas e o índice de secagem, a qual parece indicar que os dois parâmetros variam na razão directa.

7. Sugestão de trabalhos adicionais/futuros

No presente trabalho não foi possível cobrir determinados ensaios e debruçar sobre alguns assuntos que se acredita serem relevantes para uma melhor avaliação das características de humedecimento e secagem de argamassas. Durante o desenvolvimento experimental observou-se também que é possível melhorar alguns aspectos relativos a alguns ensaios, permitindo dessa forma obter melhores resultados.

Neste âmbito, apresentam-se algumas sugestões de trabalhos que se acredita serem importantes para complementar este trabalho de investigação e também para o desenvolvimento do conhecimento acerca do comportamento das argamassas, mais precisamente acerca das características de humedecimento e secagem:

- Execução de ensaios que permitam obter resultados mais precisos de porosidade de argamassas e também a realização de ensaios que forneçam informação acerca da porometria.
- Desenvolvimento de sistemas e planos de ensaio melhorados relativos à secagem das argamassas, principalmente no que diz respeito ao controlo das condições ambiente onde decorre o ensaio.
- Realização de estudos acerca do comportamento dos introdutores de ar em diferentes argamassas, bem como a execução de comparações entre diversos tipos produtos, de modo a aferir as diferentes características e desempenho de cada um.

8. Referências bibliográficas

- [1] ALVES, C. A. S. – *Estudo de deterioração de materiais graníticos aplicados em monumentos da cidade de Braga, 1997.*
- [2] ARANDIGOYEN, M. *et al* – *Lime pastes with different kneading water: Pore structure and capillary porosity.* Applied Surface Science 252 (2005) pp. 1449-1459. Elsevier, 2005.
- [3] ARANDIGOYEN, M.; ALVAREZ, J. I. – *Pore structure and mechanical properties of cement-lime mortars.* Cement and Concrete Research 37 (2007) pp. 767-775. Elsevier, 2007.
- [4] BÁGEL', L'.; ZIVICA, V. – *Relationship between pore structure and permeability of hardened cement mortars: on the choice of effective pore structure parameter.* Cement and Concrete Research 27 (1997). Elsevier, 1997.
- [5] BOYNTON, R. S. – *Chemistry and Technology of Lime and Limestone.* Second Edition. Wiley-Interscience, 1980. ISBN 0-471-02771-5.
- [6] CHAROLA, A. E. – *Water Absorption and Drying Behaviour. Laboratory Notes.* HSPV-656 Advanced Architectural Conservation.
- [7] CHATTERJI, S. – *Freezing of air-entrained cement-based materials and specific actions of air-entraining agents.* Cement and Concrete Composites 25 (2003) pp. 759-765. Elsevier, 2002.
- [8] COUNTINHO, A. S. – *Fabrico e propriedades do betão.* Volume I. 3ª edição. Lisboa: LNEC, 1997. ISBN 972-49-0326-5.
- [9] COUTINHO, A. S.; GONÇALVES, A. – *Fabrico e propriedades do betão.* Volume III. 2ª edição. Lisboa: LNEC, 1995. ISBN 972-49-1645-6.
- [10] CULTRONE, G. *et al* – *Durability of masonry systems: A laboratory study.* Construction and Building Materials 21 (2007) pp. 40-51. Elsevier, 2005.
- [11] CULTRONE, G. *et al* – *Forced and natural carbonation of lime-based mortars with and without additives: Mineralogical and textural changes.* Cement and Concrete Research 35 (2005) pp. 2278-2289. Elsevier, 2005.
- [12] DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL (DEC) / UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA (UNL) – *Análise de argamassas. Determinação da consistência.* Fichas de Ensaio: Fe 25. Caparica: FCT/UNL, 1998.
- [13] DEC/UNL – *Análise de argamassas. Determinação da resistência à flexão e compressão.* Fichas de Ensaio: Fe 27. Caparica: FCT/UNL, 1999.
- [14] DEC/UNL – *Análise de argamassas. Preparação de provetes.* Fichas de Ensaio: Fe 19. Caparica: FCT/UNL, 1996.

- [15] DEC/UNL – *Inertes para argamassas e betões. Determinação da baridade*. Fichas de Ensaio: Fe 15. Caparica: FCT/UNL, 1996.
- [16] DEC/UNL – *Pedras naturais e artificiais. Determinação da absorção de água por capilaridade*. Fichas de Ensaio: Fe 06. Caparica: FCT/UNL, 1999.
- [17] DEC/UNL – *Pedras naturais e artificiais. Determinação da permeabilidade ao vapor de água*. Fichas de Ensaio: Fe 05. Caparica: FCT/UNL, 1999.
- [18] DEC/UNL – *Pedras naturais e artificiais. Determinação da porosidade aberta*. Fichas de Ensaio: Fe 02. Caparica: FCT/UNL, 1996.
- [19] DEC/UNL – *Pedras naturais e artificiais. Determinação da massa volúmica*. Fichas de Ensaio: Fe 01. Caparica: FCT/UNL, 1996.
- [20] DEC/UNL – *Pedras naturais e artificiais. Determinação do índice de secagem*. Fichas de Ensaio: Fe 07. Caparica: FCT/UNL, 1996.
- [21] DEC/UNL – *Pedras naturais e artificiais. Determinação módulo de elasticidade dinâmico*. Fichas de Ensaio: Fe 08. Caparica: FCT/UNL, 1996.
- [22] DE SCHUTTER, G.; POPPE, A. -M. – *Quantification of the water demand of sand in mortar*. Construction and Building Materials 18 (2004) pp. 517-521. Elsevier, 2004.
- [23] EL-TURKI, A. *et al* – *The influence of relative humidity on structural and chemical changes during carbonation of hydraulic lime*. Cement and Concrete Research 37 (2007) pp. 1233-1240. Elsevier, 2007.
- [24] EUROPEEN COMITEE FOR STANDARDIZATION (CEN) – *Methods of test for mortar for masonry – Part 2: Bulk sampling of mortars and preparation of test mortars*. EN 1015-2:1998.
- [25] CEN – *Methods of test for mortar for masonry – Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)*. EN 1015-3:1999.
- [26] FARIA, P. *et al* – *Comparative evaluation of lime mortars for architectural conservation*. Journal of Cultural Heritage 9 (2008) pp. 338-346. Elsevier, 2008.
- [27] FERNANDES, V. *et al* – *Influence of the kneading water content on the behaviour of single-coat mortars*. Cement and Concrete Research 35 (2005) pp. 1900-1908. Elsevier, 2005.
- [28] GREEN, K. M. *et al* – *The effects of lime and admixtures on the water-retaining properties of cement mortars*. Cement and Concrete Research 29 (1999) pp. 1743-1747. Elsevier, 1999.

- [29] HENRIQUES, F.; CHAROLA, A. E. – *Comparative study of standard procedures for mortars*. 8th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone. Berlin, 1996.
- [30] IPQ – *Ensaaios para determinação das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 3: Método para determinação da baridade e dos vazios*. NP EN 1097-3:2002.
- [31] LAFHAJ, Z. *et al* – *Correlation between porosity, permeability and ultrasonic parameters of mortar with variable water/cement ratio and water content*. Cement and Concrete Research 36 (2006) pp. 625-633. Elsevier, 2005.
- [32] LANAS, J. *et al* – *Mechanical properties of natural hydraulic lime-based mortars*. Cement and Concrete Research 34 (2004) pp. 2191-2201. Elsevier, 2004.
- [33] LANAS, J. *et al* – *Study of the mechanical behaviour of masonry repair lime-based mortars cured and exposed under different conditions*. Cement and Concrete Research 36 (2006) pp. 961-970. Elsevier, 2005.
- [34] LANAS, J.; ALVAREZ, J. I. – *Masonry repair lime-based mortars: Factors affecting the mechanical behaviour*. Cement and Concrete Research 33 (2003) pp. 1867-1876. Elsevier, 2003.
- [35] LÓPEZ, M. J. T. – *Propiedades hídricas de los materiales lapídeos. Ensayos*.
- [36] MARTYS, N. S.; FERRARIS, C. F. – *Capillary transport in mortars and concrete*. Cement and Concrete Research 27 (1997) pp. 747-760. Elsevier, 1997.
- [37] MOSQUERA, M. J. *et al* – *Addition of cement to lime-based mortars: Effect on pore structure and vapor transport*. Cement and Concrete Research 36 (2006) pp. 1635-1642. Elsevier, 2005.
- [38] MOSQUERA, M. J. *et al* – *Pore structure in mortars applied on restoration. Effect on properties relevant to decay of granite buildings*. Cement and Concrete Research 32 (2002) pp. 1883-1888. Elsevier, 2002.
- [39] PALOMO, A. *et al* – *Historic Mortars: Characterization and Durability. New Tendencies for Research*.
- [40] PAPAYIANNI, I.; STEFANIDOU, M. – *Strength-porosity relationships in lime-pozzolan mortars*. Construction and Building Materials 20 (2006) pp. 700-705. Elsevier, 2005.
- [41] PAVÍA, S.; TREACY, E. – *A comparative study of the durability and behaviour of fat lime and feebly-hydraulic lime mortars*. Materials and Structures 39 (2006) pp. 391-398. RILEM, 2006.
- [42] PINTO, A. P. F. – *Conservação de Pedras Carbonatadas: Estudo e selecção de tratamentos*. IST, Lisboa, 2002.

- [43] RATO, V. N. M. – *Influência da microestrutura morfológica no comportamento de argamassas*. Tese de Doutorado em Engenharia Civil apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, 2006.
- [44] REDDY, B. V. V.; GUPTA, A. – *Influence of sand grading on the characteristics of mortars and soil-cement block masonry*. Construction and Building Materials 22 (2008) pp. 1614-1623. Elsevier, 2007.
- [45] RODRIGUES, J. D. – *A proposal for classification of salt crystallization behaviour of plasters and renders*. COMPASS: classification of plasters and renders.
- [46] RODRIGUES, P. F. – *Tecnologias de Revestimentos*. Apontamentos das aulas teóricas. 2007/2008.
- [47] SEABRA, M. P. *et al* – *Admixtures effect on fresh state properties of aerial lime based mortars*. Construction and Building Materials (2008). Elsevier, 2008.
- [48] SEABRA, M. P. *et al* – *Rheological behaviour of hydraulic lime-based mortars*. Journal of the European Ceramic Society 27 (2007) pp. 1735-1741. Elsevier, 2006.
- [49] SKOCZYLAS, F. *et al* – *About drying effects and poro-mechanical behaviour of mortars*. Cement and Concrete Composites 29 (2007) pp. 383-390. Elsevier, 2006.
- [50] STEFANIDOU, M.; PAPAYIANNI, I. – *The role of aggregates on the structure and properties of lime mortars*. Cement and Concrete Composites 27 (2005) pp. 914-919. Elsevier, 2005.
- [51] VAN BALEN, K. – *Carbonation reaction of lime, kinetics at ambient temperature*. Cement and Concrete Research 35 (2005) pp. 647-657. Elsevier, 2004.
- [52] WINNEFELD, F.; BÖTTGER, K. G. – *How clayey fines in aggregates influence the properties of lime mortars*. Materials and Structures 39 (2006) pp. 433-443. RILEM, 2006.
- [53] YURTDAS, I. *et al* – *Influences of water by cement ratio on mechanical properties of mortars submitted to drying*. Cement and Concrete Research 36 (2006) pp. 1286-1293. Elsevier, 2006.

9. Anexos

9.1. Anexo 1

Construction

Ficha de Produto
Edição de Julho 2007
Nº de identificação: 1.44
Versão nº 12
Sika-AER® 5

Sika-AER® 5

Introdutor de ar

Descrição do produto

Sika-AER® 5 é um adjuvante introdutor de ar para betão de acordo com a norma EN 934-2:T5.
Sika-AER® 5 permite aumentar a quantidade de ar oculto no betão, sob a forma de bolhas finas muito estáveis e uniformemente repartidas no betão. Devido às suas características (dimensão das bolhas de ar, estabilidade no tempo do ar oculto, distribuição homogênea) o Sika-AER® 5 permite obter betões endurecidos com uma maior resistência às acções do gelo-degelo.

Utilizações

Betão submetido à acção gelo-degelo:

- Obras na montanha.
- Obras de arte.
- Estradas em betão.
- Barragens.

Betão com baixo teor de elementos finos:

Quando há falta de finos, a betonagem é difícil e nestes casos, a utilização do Sika-AER® 5, que actua como corrector granulométrico, torna o betão mais trabalhável e mais fácil de betonar, devido ao efeito lubrificante de "rolamento de esferas" das bolhas de ar.

Betonagem em moldes deslizantes:

O adjuvante Sika-AER® 5 aumenta a tixotropia do betão e permite realizar a betonagem em contínuo: calhas, valetas, etc.

Características / Vantagens

As bolhas de ar, de diâmetro inferior ao dos grãos de cimento e da areia mais fina, actuam como finos deformáveis e melhoram as propriedades reológicas do betão fresco:

- Aumentando a trabalhabilidade do betão.
- Conferindo um melhor aspecto ao betão após a desmoldagem.
- Limita o efeito da capilaridade ou sucção capilar no betão endurecido, bloqueando a penetração dos líquidos ao nível da bolha de ar. A diminuição da capilaridade aumenta a durabilidade do betão submetido aos ciclos de gelo-degelo.

Certificados / Boletins de ensaio

Conforme as especificações da norma EN 934-2.

Dados do produto

Aspecto / Cor

Líquido castanho.

Fornecimento

25 e 200 kg.

Armazenagem e conservação

O produto deve estar armazenado em boas condições, nas embalagens de origem bem fechadas.
Conserva-se 6 meses a partir da data de fabrico.



Dados técnicos

Base química Compostos tensioactivos.

Massa volúmica
(23 ± 2 °C) 1,03 ± 0,02 kg/dm³.

pH (23 ± 2 °C) 11,0 ± 1,0.

Teor de sólidos 8,5 ± 0,5%.

Teor em iões cloreto < 0,1%.

Temperatura de cristalização - 1 °C.

Informação sobre o sistema

Pormenores de aplicação

Consumo / Dosagem Gama de utilização: 0,1% a 0,7% litro para 100 kg de cimento, segundo a quantidade de ar introduzido desejada.
A dosagem normal de Sika-AER® 5 é de 0,15% sobre o peso do cimento.
A quantidade de ar introduzido é função da dosagem do Sika-AER® 5, mas depende também da composição do betão (natureza e quantidade de finos), da sua plasticidade, do tempo de amassadura e da limpeza dos agregados, o que impõe um controlo diário em estaleiro da regularidade da percentagem de ar oculto.

Instruções de aplicação

Mistura Introduzir Sika-AER® 5 na água de amassadura antes de esta ser despejada na betoneira. Misturar o betão pelo menos 90 segundos e manter constante o tempo de mistura para sucessivas amassaduras.
Nunca adicionar o adjuvante ao cimento ou agregados, em seco (redução de eficácia).

Aplicação Sika-AER® 5 permite o fabrico de betão de qualidade, consequentemente devem ser cumpridas as regras de boa prática para o fabrico, a colocação e a cura do betão.

Limpeza de ferramentas Com água.

Importante Recomenda-se a realização de ensaios prévios para se encontrar a dosagem ótima do adjuvante e sempre que se altere a composição do betão.
Com geada intensa o adjuvante pode gelar, porém uma vez descongelado lentamente, deve verificar-se que o produto não ficou alterado.
Para qualquer esclarecimento, consultar o Departamento Técnico Sika.

Nota Todos os dados técnicos referidos nesta Ficha de Produto são baseados em ensaios laboratoriais. Ensaios realizados noutras condições para determinação das mesmas características podem dar resultados diferentes devido a circunstâncias que estão fora do nosso controlo.

Risco e segurança

Medidas de segurança Mercadoria não perigosa para transporte.
Este produto não está classificado de acordo com a legislação da UE.
Para mais informações consultar a Ficha de Dados de Segurança do produto e o respectivo rótulo.

Construction



"O produto está seguro na C^a Seguros XL Insurance Switzerland (Apólice nº CH00003018LI05A), a título de responsabilidade civil do fabricante".

A informação e em particular as recomendações relacionadas com aplicação e utilização final dos produtos Sika, são fornecidas em boa fé e baseadas no conhecimento e experiência dos produtos sempre que devidamente armazenados, manuseados e aplicados em condições normais, de acordo com as recomendações da Sika. Na prática, as diferenças no estado dos materiais, das superfícies, e das condições de aplicação em obra, são de tal forma imprevisíveis que nenhuma garantia a respeito da comercialização ou aptidão para um fim em particular, nem qualquer responsabilidade decorrente de qualquer relacionamento legal, poderão ser inferidas desta informação, ou de qualquer recomendação por escrito, ou de qualquer outra recomendação dada. O produto deve ser ensaiado para aferir a adequabilidade do mesmo à aplicação e fins pretendidos. Os direitos de propriedade de terceiros deverão ser observados. Todas as encomendas aceites estão sujeitas às nossas condições de venda e de entrega vigentes. Os utilizadores deverão sempre consultar a versão mais recente da nossa Ficha de Produto específica do produto a que diz respeito, que será entregue sempre que pedida.

Sika Portugal, SA
R. de Santarém, 113
4400-292 V. N. Gaia
Portugal
Tel. +351 22 377 69 00
Fax +351 22 370 20 12
www.sika.pt



Sika-AER® 5 3/3

9.2. Anexo 2

Este anexo contém gráficos de auxílio para a interpretação dos dados relativos ao quadro 4.6.. As figura 9.1. e 9.2. agrupam os resultados dos valores do coeficiente de absorção de água por capilaridade e valores assintóticos de absorção das várias argamassas, respectivamente. Os resultados estão agrupados por argamassas com o mesmo tipo de ligante, variando o tipo de agregado e quantidade de água, à excepção das argamassas com utilização de introdutor de ar cujos resultados são apresentados todos conjuntamente.

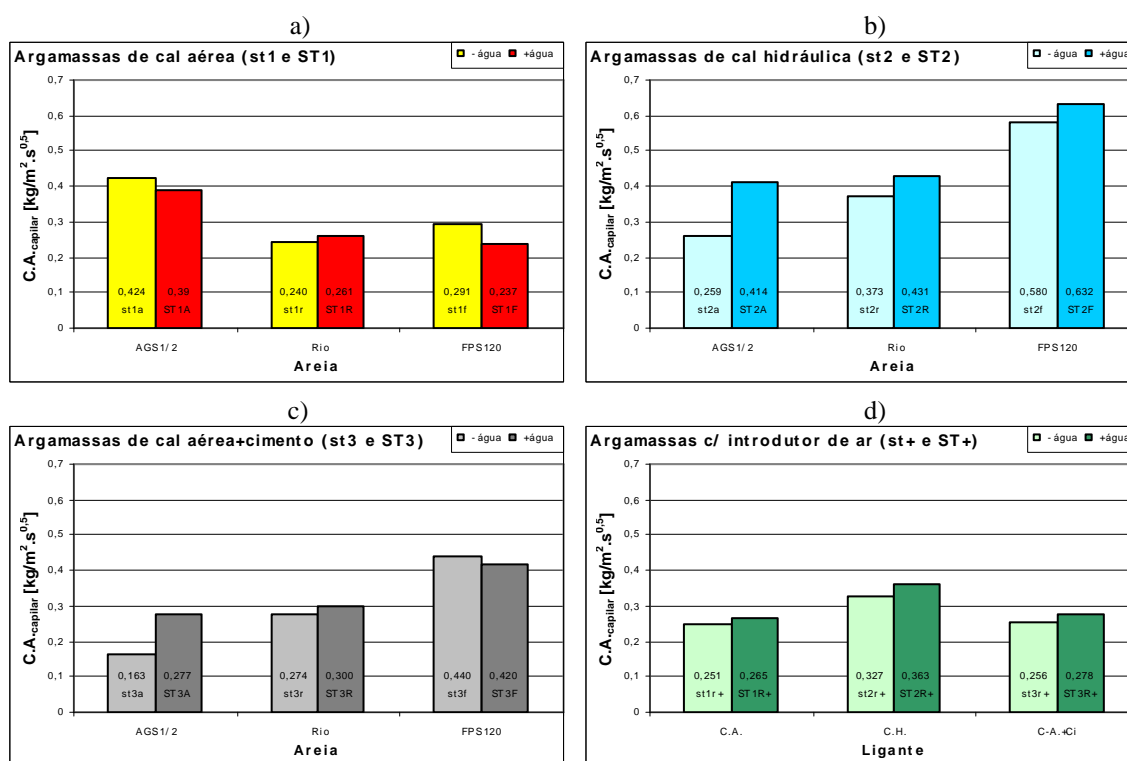


Figura 9.1. – Coeficientes de absorção de água por capilaridade das argamassas. a) Argamassas de cal aérea; b) Argamassas de cal hidráulica; c) Argamassas bastardas; d) Argamassas com introdutor de ar. (C.A. – cal aérea; C.H. – cal hidráulica; C.A.+Ci – cal aérea+cimento)

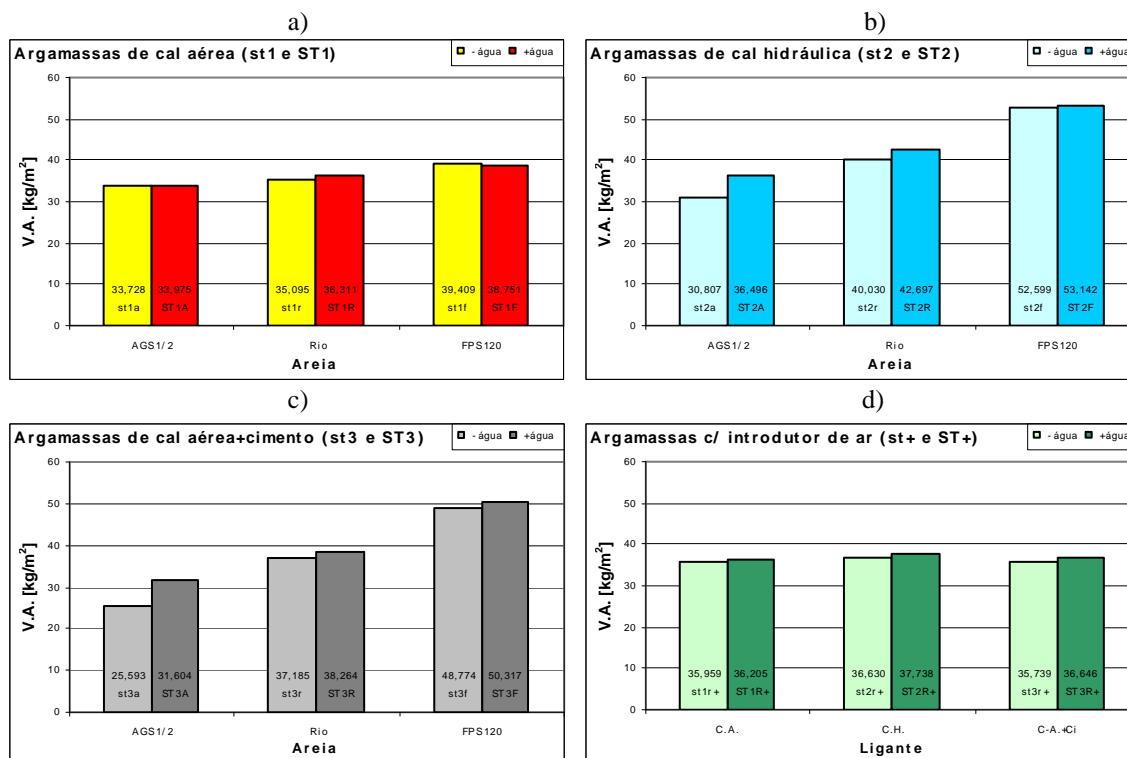


Figura 9.2. – Valores assintóticos de absorção de água por capilaridade. a) Argamassas de cal aérea; b) Argamassas de cal hidráulica; c) Argamassas bastardas; d) Argamassas com introdutor de ar. (C.A. – cal aérea; C.H. – cal hidráulica; C.A.+Ci – cal aérea+cimento)

A figura 9.3. compara os valores de absorção de água por capilaridade e valores assintóticos de absorção de argamassas com e sem a utilização de introdutor de ar.

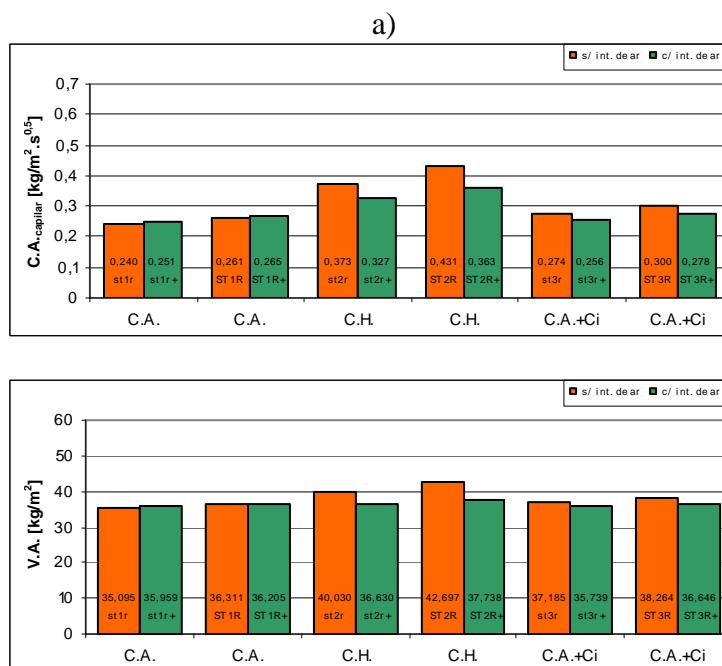


Figura 9.3. – Comparação de argamassas com e sem utilização de introdutor de ar. a) Coeficiente de absorção de água por capilaridade; b) Valor assintótico de absorção de água por capilaridade